الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية

المغمورة بالزيت

م. محمد صبحي عساف



مراجعة

المهندس صالح البطاط

2023

الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية

المغمورة بالزيت

إعداد

المهندس محمد صبحي عساف

المملكة الأردنية الهاشمــية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2022/12/6235)

621.314
عساف، محمد صبحي عبدالكريم
الفحوصات التشخيصية للمحولات الكهربائية المغمورة بالزيت / محمد صبحي عبدالكريم عساف .- الزرقاء:المؤلف، 2022

( ) ص .
ر. إ. : **2022/12/6235.**
الواصفات : /المحولات الكهربائية//العزل الكهربائي//الاختبار الكهربائي//الهندسة الكهربائية/

يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبّر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية أو أي جهة حكومية أخرى.

ISBN 978-9923-00-566-8 (ردمك)



هذا الكتاب وقف لله تعالى

تمهيد

نحمد الله تعالى، ونستعينه، ونستهديه. ونصلي ونسلم على سيد المرسلين سيدنا محمد وعلى آله وأصحابه أجمعين، وبعد،،

شرعت في الكتابة مستعيناً بالله ومتوكلاً عليه، بعد الذي رأيت من نقص في المحتوى العربي الذي يتناول هذا النوع من العلوم، فهنالك العدد اليسير من الكتب العربية التي تناولت المحولات الكهربائية من الناحية التصميمية أو التركيبية أو كعنصر من عناصر المنظومة الكهربائية؛ ككتب الدكتور محمود الجيلاني والدكتورة كاميليا محمد وغيرهم. أما هذا الكتاب فقد عُني بشرح الفحوصات التشخيصية لمحولات القوى الكهربائية المغمورة بالزيت وأكاد لا أجد كتاباً عربياً يشير لهذا الموضوع بشرحه المُفصّل، حيث تم تناول هذا الموضوع من الناحية النظرية والعملية إستناداً إلى أشهر المراجع والمعايير الصادرة عن المعاهد والمنظمات العالمية، كمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **IEEE** واللجنة الكهروتقنية الدولية **IEC** والمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **CIGRE**، بالإضافة إلى ما وفقني الله لنيله من الخبرات العملية في سنوات عملي كمهندس صيانة كهربائية في كبرى محطات توليد الطاقة الكهربائية في الأردن؛ كمحطة السمرا لتوليد الكهرباء ومحطة العطارات لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة الحرق المباشر للصخر الزيتي. فما وجدتم من سبق في هذا الكتاب فأعينوني على تصويبه بمراسلتي على بريدي الإلكتروني، فإن أصبت في كتابتي فمن الله و إن أخطأت فمن نفسي والشيطان.

تمت الكتابة باللغة العربية لإثراء المحتوى العربي ولتيسير الفهم على مهندسي وفنيي الكهرباء مع الحفاظ على المصطلحات والمعادلات جميعها باللغة الإنجليزية.

ولا أملك لزوجتي دانية وأبنائي أويس وراكان إلا أن أدعوا لهم بأن يتقبل لهم الله أعمالهم لقاء وقتهم وحقوقهم التي نقصت في ثنايا إعداد هذا الكتاب عن رضى منهم وحب. سائلاً المولى عز وجل أن ينفع بهم وبهذا الكتاب ويقبله خالصاً لوجهه.

إلى أبي وأمي.... عليهما رحمة الله

المهندس محمد صبحي عساف

المقدمة

تُعد المحولات الكهربائية من أهم أجزاء المنظومة الكهربائية لما لها من دور كبير في زيادة موثوقية الشبكة الكهربائية وديمومة سريان التيار الكهربائي، فلو نظرنا بصورة مُعمقة للمنظومة الكهربائية لوجدنا المحولات الكهربائية تلعب دوراً أساسياً في ربط عناصر هذه المنظومة من محطات توليد ومحطات تحويل ومشتركين كُلاً بمستوى فولتية مناسب له، بل وأي فشل في هذه المحولات سيؤدي لفشل المنظومة كُكُل في بعض الحالات. وبناءاً على ما سبق ونظراً للتكلفة المرتفعة لمحولات القدرة كان لزاماً علينا أن نولي هذه المُعدّة الإهتمام الكامل وهو منهاجنا في هذا الكتاب، فهنالك من الكُتب ما عُني بشرح المحول من الناحية التصميمية ومنها ما عُني بالنواحي التشغيلية ومنها ما عُني بصيانة هذه المحولات. وهذا الكتاب يندرج تحت الكتب التي تُعنى بالصيانة الكهربائية للمحولات، ولتستقيم عملية الصيانة لا بُد من تحديد الأعطال بشكل دقيق لتتم الصيانة بشكل فعال وبأسرع وقت ممكن للتقليل من زمن التوقفات غير المبرمجة للمنظومة الكهربائية. حيث تناول هذا الكتاب الفحوصات التشخيصية اللازمة للكشف عن الأعطال في محولات القوى الكهربائية المغمورة بالزيت.

تم تقسيم الكتاب لثمانية فصول، حيث قمت بتضمين سبعة فحوصات تشخيصية لمحولات القوى الكهربائية في هذا الكتاب وهي من أهم الفحوصات وأكثرها إنتشاراً علّي أجد مستقبلاً مُتسعاً من الوقت لتناول باقي الفحوصات في كتاب لاحق.

وكانت فصول الكتاب كالآتي:

- **الفصل الأول** : مقدمة في المحولات الكهربائية من الناحية النظرية والعملية.
- **الفصل الثاني** : فحص مقاومة العزل.
- **الفصل الثالث** : فحص مقاومة الملفات.
- **الفصل الرابع** : فحص نسبة لفات المحول.
- **الفصل الخامس** : فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة.
- **الفصل السادس** : فحص تيار التهييج.
- **الفصل السابع** : فحص مُفاعلة التسرُب.
- **الفصل الثامن** : فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي.

ولتيسير الفهم تم التدرُّج في الشرح لهذه الفحوصات وفقاً للمحاور التالية:

- **المحور الأول:** مقدمة عامة حول الفحص تتضمن أهمية اللجوء لهذا الفحص بشكل عام وكذلك الجزء من المحول الذي يستهدفه هذا الفحص.
- **المحور الثاني:** ذكر المواطن التي يتم إجراء هذا الفحص بها، إلى جانب كونه من الفحوصات التشخيصية.
- **المحور الثالث:** بيان الأعطال التي يتم الكشف عنها بإستخدام هذا الفحص، بالإضافة إلى الدلائل التي تدفعُنا لإجراء هذا الفحص على وجه الخصوص.

- **المحور الرابع:** توضيح فلسفة الفحص وذلك بالشرح المُفصّل لمبدأ عمل الفحص وطُرقه وأساليبه وتوصيلاته، بالإضافة للأمور التي لا بُد من مراعاتها قبل البدء بالفحص إن وجدت.
- **المحور الخامس:** بيان خطوات الفحص بالتفصيل.
- **المحور السادس:** تصحيح القيمة المُقاسة بإستخدام المعادلات والجداول.
- **المحور السابع:** تحليل القيمة المُقاسة بعد تصحيحها، وذلك بالرجوع إلى أشهر المراجع والمعايير العالمية بالإضافة للخبرة السابقة.
- **المحور الثامن:** أمثلة على نتائج فحوصات مَصنعيّة.
- **المحور التاسع:** مُلحقات لكيفية الفحص بإستخدام أجهزة الفحص المتوفرة والمنتشرة بالسوق العالمية وذلك بذِكر خطوات الفحص وتوصيلاته بالجهاز، بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسط إستناداً على خبرتي بالتعامل مع هذه الأجهزة مُسبقاً. وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام أجهزة الفحص المُشار إليها في الملحقات سابقة الذِكر، لا يجب الإعتماد على هذه المُلحقات فقط، بل يجب قراءة الكُتيّبات التفصيلية الخاصة بهذه الأجهزة والمُزودة بواسطة الشركة المُصنِّعة لأجهزة الفحص مثل (**MEGGER** و **METREL** و **FLUKE** و **OMICRON**) جيداً وخصوصاً الخطوات التشغيليّة والسلامة العامة. مع التنويه على أن حقوق جميع الصور الواردة في هذه الملحقات تعود للشركة المُصنّعة لجهاز الفحص سابقة الذِكر، حيث تمت إعادة طباعة هذه الصور وإستخدامها في هذا الكتاب غير المخصص للبيع.
- **المحور العاشر:** مُلحقات تضم معلومات وجداول تُفيد في توصيلة الفحص أو في تصحيح القيمة المُقاسة.

قائمة المحتويات

الفصل الأول

مقدمة في المحولات



مقدمة في المحولات

نكاد لا نَجدُ مكاناً يَسكُنه البشر يخلو من المحولات تلك المُعدة التي جاوز وجودها المئة عام، وذلك إبتداءاً من التطبيقات الصغيرة في المنازل وإنتهاءاً بمحولات القوى الكهربائية في محطات توليد الطاقة الكهربائية ومحطات التحويل. فلو نظرنا إلى المنظومة الكهربائية لوجدنا هذه المحولات تلعب دوراً أساسياً في نقل الطاقة الكهربائية لمسافات طويلة، وذات الدور في توزيع هذه الطاقة الكهربائية كمحولات التوزيع واسعة الإنتشار، أي بمعنى آخر أنها تقوم بربط محطات التوليد بشبكة النقل وكذلك ربط شبكة النقل بشبكة التوزيع بالإضافة إلى ربط شبكة التوزيع بالمستهلكين متيحةً عمل هذه الأنظمة من توليد ونقل وتوزيع ومستهلكين على مستوى فولتية ملائم لكل منها.

ومن هذا المنطلق وقبل الخوض بشرح الفحوصات التشخيصية لهذه المحولات، كان لزاماً علينا أن نتطرق لشرح مُبسّط لهذه المحولات من ناحية مبدأ العمل والتركيب مما يجعل القارئ على معرفة تامة بأجزاء المحول الداخلية والخارجية متيحةً له فهم أوسع للفحوصات و ما تكشفهُ من أعطال في هذا المحول.

1. ما هو المحول

عرّفت اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) المحول على أنه مُعدّة إستاتيكية - أي أنها لا تحتوي على أجزاء متحركة - تتكون من ملفين أو أكثر، وظيفتها الأساسية تحويل الفولتية والتيار المتردد من مستوى إلى آخر مع ثبات التردد وفقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي وذلك لغايات نقل الطاقة الكهربائية.

حيثُ يَقوم المحول بتحويل الطاقة الكهربائية المُطبّقة على ملفاته الإبتدائية إلى طاقة مغناطيسية ثم يُعيد تحويلها إلى طاقة كهربائية في دائرة أخرى وهي الملفات الثانوية، مما يعني أن الملفات الإبتدائية والثانوية للمحول غير مُتصلة كهربائياً وإنما مُتصلة مغناطيسياً عبر القلب الحديدي للمحول فقط.

ومن الجدير بالذكر أن اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) لا تُفرّق بين المحولات على أساس أنها محولات قوى أو توزيع، وإنما تتعامل مع المحول على أنه مُعدّة وظيفتها تحويل الفولتية والتيار المُتردد من مستوى لآخَر كما ذُكر في تعريف المحول دون التطرُق للتطبيق الذي يَشغلهُ هذا المحول. ولكن تقليدياً ومن المُتعارف عليه أن المحولات الكهربائية المُستخدمة لإيصال الطاقة الكهربائية للمُستهلكين بفولتيات قُرابة الـ**400** فولت أو أقل عبر ملفاتها الثانوية هي محولات توزيع وأكبر من ذلك هي محولات قوى، ومنهم من ذهب إلى إعتبار أن المحولات ذات فولتية الملفات الإبتدائية التي تصل إلى **72.5** كيلوفولت كحد أقصى وسعتها تكون عشرات الميجا فولت أمبير هي محولات توزيع وأكبر من ذلك هي محولات قوى حيث تصل فولتية ملفاتها الإبتدائية إلى قرابة الـ**800** كيلو فولت وسعتها مئات الميجا فولت أمبير. وفي هذا الباب الحديث يطول ويطول فمنهم من ذهب إلى إعتبار المحولات ذات السِعة الأقل من **500** كيلو فولت أمبير على أنها محولات توزيع والمحولات ذات السِعة الأكبر من ذلك على أنها محولات قوى.

ونظراً للتشابه الكبير في التركيب بين محولات القوى والتوزيع بالإضافة إلى التشابُه من ناحية الفحوصات الكهربائية وأيضاً لشُيوع الزيت المعدني كوسط عازل فيهما، فإنه عند ذِكر المحول في هذا الكتاب سيكون

المقصود به محولات القوى والتوزيع المغمورة بالزيت دون تفرقة بينهما وفقاً لرؤية اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**).

2. أنواع المحولات

تنقسم المحولات الكهربائية إلى عدة أقسام رئيسية وفقاً للعديد من المعايير كعدد الأطوار ونسبة تحويل الفولتية ونوع القلب الحديدي ونوع التبريد والوظيفة المُناطة بهذا المحول بالإضافة لموقعهِ على الشبكة الكهربائية إلى الآتي:



3. مبدأ عمل المحول الكهربائي

عند شرح مبدأ عمل المحول الكهربائي فإن الضياعات (**Losses**) في القدرة داخل المحول تلعب دوراً كبيراً في زيادة صعوبة فهم مبدأ العمل، وهذا بدوره يُفسّر إبتداء أغلب المراجع بشرح مبدأ عمل المحول المثالي (**Ideal transformer**) عند الحديث عن المحول الكهربائي الواقعي (**Actual transformer**)، حيث يُعتبر المحول المثالي محول إفتراضي - غير موجود بالواقع - عديم الضياعات و ذو كفاءة تصل لـ (**100%**) بالمئة، وتم إفتراضُه لتيسير شرح وفهم مبدأ عمل المحول الكهربائي الواقعي. وتتلخص خصائص المحول المثالي بالنقاط التالية:

- ✓ قيمة مقاومة الملفات الإبتدائية والثانوية مُساوية للصفر، أي لا وجود للضياعات الناتجة عن هذه المقاومات.

- ✓ قيمة نفاذية مغناطيسية (**Permeability**) لا نهائية للمادة المُكوّنة للقلب الحديدي (**Iron core**)، أي لا وجود للضياعات الهستيرية (**Hysteresis losses**).
- ✓ قيمة الفيض المغناطيسي المُتسرب (**Leakage flux**) خارج القلب الحديدي (**Iron core**) مُساوية للصفر، أي أن الفيض المغناطيسي الناشئ عن مرور تيار في الملفات الإبتدائية ينتقل بشكل كامل للملفات الثانوية دون وجود فيض مُتسرب على شكل ضياعات.
- ✓ قيمة التيارات الدَّوّامية (**Eddy currents**) في القلب الحديدي (**Iron core**) و الملفات مُساوية للصفر، أي لا وجود للضياعات الناتجة عن هذه التيارات.

بناءاً على هذه الخصائص يُمكن ملاحظة إهمال ضياعات القدرة كافّة - المغناطيسية والكهربائية - في المحولات المثالية (**Ideal transformers**)، ويتم إعتبار القُدرة الداخلة للمحول (P_{in}) مُساوية للقُدرة الخارجة منه (P_{out}) وكذلك الفولتية على أطرافه (V_1 و V_2) مُساوية للقُوة الدافعة الكهربائية المُتولدة من الحث الكهرومغناطيسي (E_1 و E_2) بالترتيب و أيضاً تكون نسبة عدد اللفات (N_1/N_2) مساوية لنسبة الفولتية (V_1/V_2).

وهذه الخصائص غير موجوة عملياً بالمحولات الواقعية (**Actual transformers**) نظراً لوجود قيمة لمقاومة الملفات ووجود فيض تَسرُبي ووجود تيارات دَوّامية وكذلك صعوبة الحصول على مادة مُكوّنة للقلب الحديدي لانهائية النفاذية المغناطيسية. لذلك عند دراسة المحول الواقعي (**Actual transformer**) يجب الأخذ بعين الإعتبار الضياعات جميعها التي تم إهمالها عند شرح مبدأ عمل المحول المثالي (**Ideal transformer**).

ونستنتج مما سبق أن المحول المثالي (**Ideal transformer**) والمحول الواقعي (**Actual transformer**) يتطابقان بمبدأ العمل ويفترقان بأن المحول المثالي هو محول عديم الضياعات، أما المحول الواقعي فإنه يحتوي على العديد من الضياعات في دائرتيه المغناطيسية والكهربائية والتي سيتم شرحها بالتفصيل لاحقاً في هذا الفصل. ومنه ولتبسيط الأمر يمكن القول أن المحول الواقعي ما هو إلا محول مثالي مُضافاً إليه ضياعات القُدرة جميعها.

$$Actual\ Transformer = Ideal\ Transformer + Losses$$

لذلك سيكون منهاجنا في دراسة مبدأ عمل المحول الكهربائي الواقعي **أولاً** بدراسة مبدأ عمل المحول المثالي **وثانياً** بشرح ضياعات القدرة في المحولات الواقعية، و بذلك يكون المُتلقي قد أحاط بمبدأ العمل وبالضياعات وعندها سيكون قادراً على فهم مبدأ عمل المحول الواقعي ورسم الدائرة المُكافئة والمُخطط المُتجهي الخاص به.

3.1 مبدأ عمل المحول المثالي

يعمل المحول المثالي (**Ideal transformer**) وفقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي، حيث أن ملفاته الإبتدائية تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية والمُتمثلة بالفولتية المترددة المُطبقة والتيار الذي يَسري في ملفاته الإبتدائية إلى فيض مغناطيسي ينتقل عبر القلب الحديدي إلى الملفات الثانوية، ومن ثم يتم تحويل هذا الفيض إلى طاقة كهربائية مرة أُخرى مُتمثلة بفولتية مترددة على أطرافه الثانوية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية (**Electro-Motive Force EMF -** e) حسب قانوني فارادى-نيومان و لينز وفقاً للمعادلة التالية:

$$e = -n\,\frac{d\varphi}{dt} \qquad (1.1)$$

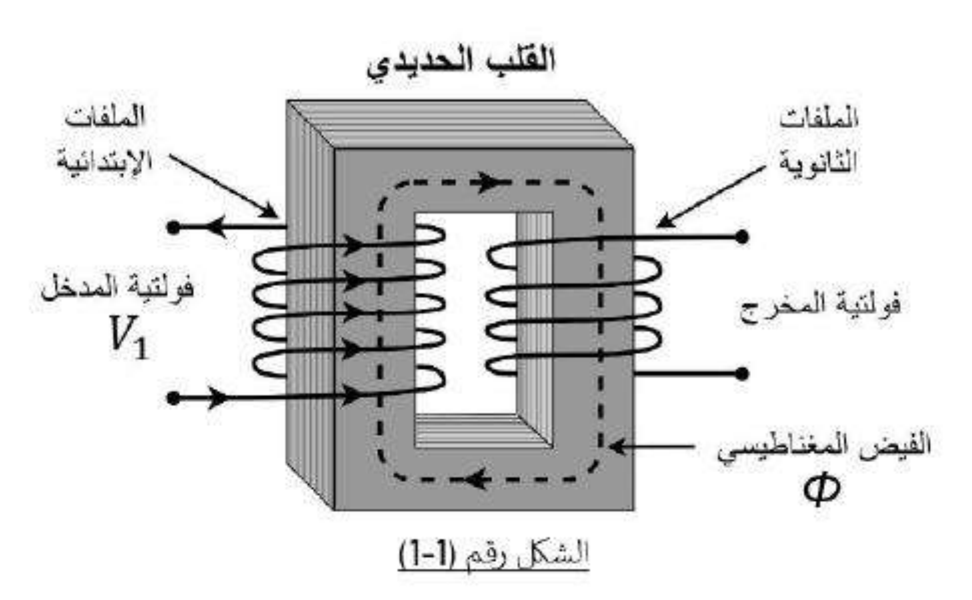
حيث؛

e : القيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربائية (فولتية) المُتولدة نتيجة للتغيُّر في الفيض المغناطيسي.

n : عدد اللفات.

$\frac{d\varphi}{dt}$: معدل تغيُّر الفيض المغناطيسي مع الزمن.

ومنه يُمكن ملاحظة أن القوة الدافعة الكهربائية (**EMF –** e) الناشئة في سِلك ضمن دائرة مُغلقة تتناسب مع مقدار التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرض له السِلك (قانون فارادى-نيومان) وتكون هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة للفيض الذي أنشأها (قانون لينز) لذلك وضِعت إشارة السالب في المعادلة (**1.1**).



الشكل رقم (1-1)

وبما أن الفولتية المُطبقة على الملف الإبتدائي (V_1) على شكل مَوجة جَيبية، فإن الفيض المُتكَون سيكون جَيبي أيضاً أيضاً ($\phi = \phi_M \sin(\omega t)$) حيث ($\phi_M$) تُعبّر عن قيمة الفيض العُظمى (**Peak value**).

$$e = -n\,\frac{d\phi_M \sin(\omega t)}{dt} \quad (1.2)$$

$$e = -n\,\omega\,\phi_M \cos(\omega t) \quad (1.3)$$

ولأن قيمة القوة الدافعة الكهربائية (e) قيمة مُتفاوتة كما هو موضح بالمعادلة (**1.3**) بدلالة وجود ($\cos(\omega t)$) في المعادلة، فلا بُد من إيجاد قيمة الجذر التربيعي لمتوسط القِيَم المُربعة (**Root Mean Square – RMS**) وذلك بالقِسمة على الجذر التربيعي للعدد إثنان ($\sqrt{2}$)، حتى يتسنى لنا التعامل حسابياً مع هذه القيمة بسهولة ويُسر.

$$E = -\,\frac{n\,\omega\,\phi_M}{\sqrt{2}} \quad (1.4)$$

بتعويض قيمة السرعة الزاوية (**Angular speed – ω**) المُساوية لـ($2\pi f$) بالمعادلة، حيث (f) تُعبّر عن التردد لتصبح المعادلة كالتالي:

$$E = -4.44\,n\,\phi_M\,f \quad (1.5)$$

كما ويُمكن الإستعاضة عن قيمة الفيض العُظمى (ϕ_M) بقيمة كثافة الفيض العظمى (B_M) مضروبة بمساحة المقطع العرضي للقلب الحديدي (A) الذي تقطعه خطوط مجال هذا الفيض لتصبح المعادلة:

$$E = -4.44\,n\,B_M\,A\,f \quad (1.6)$$

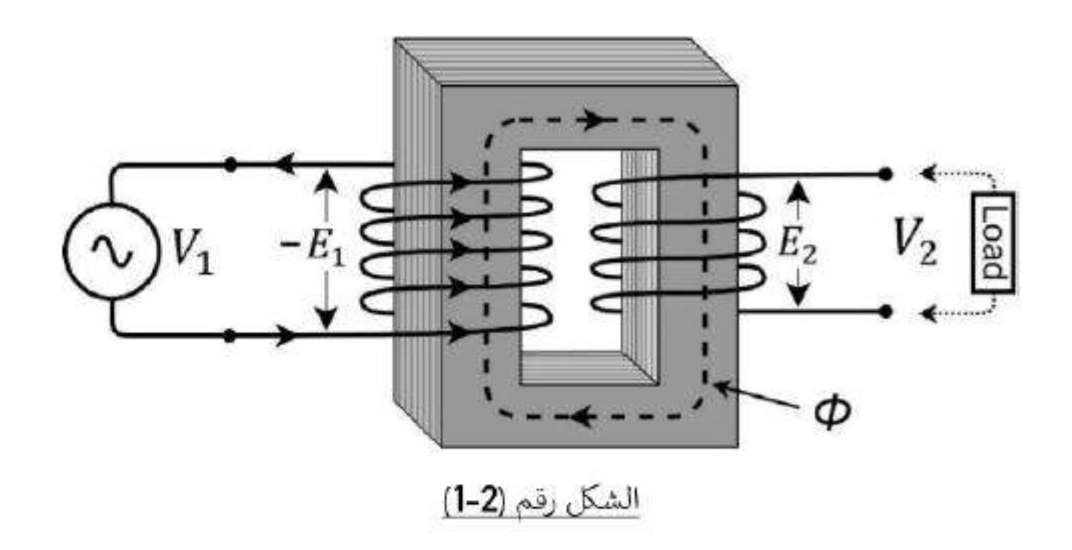
وبذلك نكون قد وصلنا للمعادلتان اللتان توضحان مقدار القوة الدافعة المتولدة في الملفات الإبتدائية والثانوية بالترتيب:

$$E_1 = -4.44\,n_1\,\phi_M\,f \quad (1.7)$$

$$E_2 = -4.44\,n_2\,\phi_M\,f \quad (1.8)$$

وبقسمة المعادلة (**1.7**) على المعادلة (**1.8**) تظهر العلاقة بين الفولتية وعدد اللفات في المحولات المثالية وفقاً للمعادلة التالية:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (1.9)$$

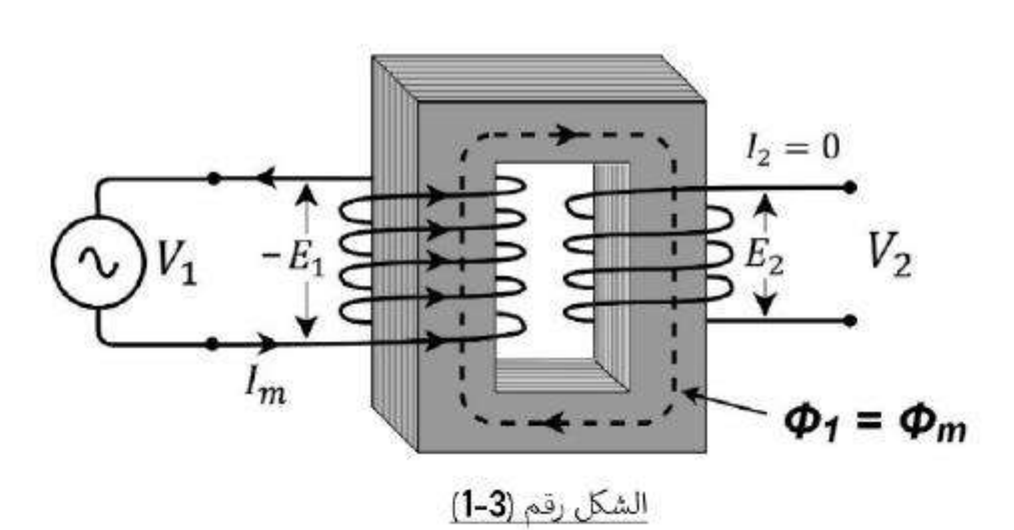


الشكل رقم (1-2)

فعند تطبيق فولتية مترددة على أطراف الملفات الإبتدائية لمحول كما هو مبين بالشكل (1-2)، هنالك حالتين للدراسة وهما:

- **الحالة الأولى:** إذا كان المحول غير موصول بحمل أو ما يُسمى بحالة اللاحمل (**No-Load**).

في هذه الحالة فإنه عند تطبيق الفولتية المترددة على أطراف المحول الإبتدائية ينشأ تيار تهييج – مغنطة - قليل (**Magnetization current - I_m**) في هذه الملفات مُنتجاً فيض مغناطيسي إبتدائي (ϕ_1)، وفي حالتنا هذه - حالة اللاحمل - يُكون هو نفسه الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) وذلك لعدم وجود فيض مغناطيسي ثانوي (ϕ_2) نتيجة لعدم مرور تيار في الدائرة الثانوية المفتوحة للمحول - لعدم وجود حمل - .



الشكل رقم (1-3)

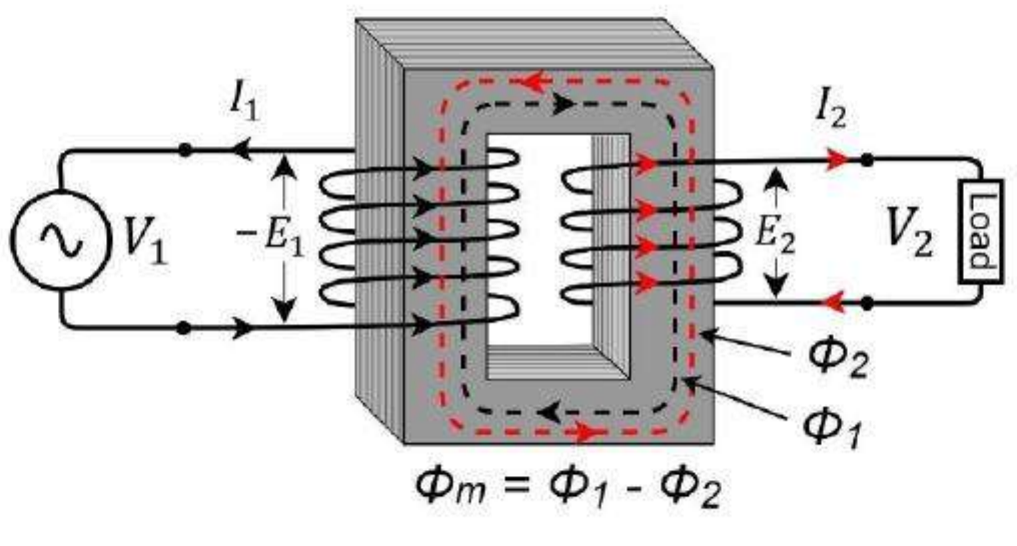
حيث أن هذا الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) الذي ينتقل بشكل كامل إلى الملفات الثانوية عبر القلب الحديدي سيؤدي لظهور قوة دافعة كهربائية مُعاكسة ($-E_1$ و E_2) في الملفات الإبتدائية و الثانوية نتيجة لقطع هذا المجال لهذين الملفين. فلو نظرنا إلى الملفات الإبتدائية سنجد قيمتين للفولتية، إحداهما قيمة الفولتية المُطبقة - فولتية المصدر - و المشار إليها بالرمز (V_1) و الأخرى هي الفولتية المتولدة نتيجة لتأثير الفيض المشترك (ϕ_m) على الملفات الإبتدائية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية ($-E_1$)، حيث تكون

هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة لقيمة الفولتية المُطبقة (V_1) حسب قانون لنز، أي أن الفولتية المُحصلة ($V_1 - E_1$) المُطبقة على الملفات الإبتدائية تكون قليلة مما يُفسّر ظهور تيار تهييج - مغنطة - قليل ($\downarrow I_m$) وهذا ما يُعرف بظاهرة القوة الدافعة الكهربائية المُعاكسة (**Back EMF**).

أما فيما يَخص الملفات الثانوية، فإن الفيض المُشترك (φ_m) سيؤدي لظهور قوة دافعة كهربائية (E_2) على أطراف هذه الملفات كما هو مبين بالشكل (**1-3**).

- **الحالة الثانية:** إذا كان المحول موصول بحمل (**Loaded**).

في هذه الحالة فإنه عند تطبيق الفولتية المترددة على أطراف المحول الإبتدائية ينشأ تيار تهييج - مغنطة -(I_m) في هذه الملفات وفيض مغناطيسي إبتدائي (ϕ_1) يقطع الملفات الثانوية مُنتجاً قوة دافعة كهربائية فيها (E_2) و فولتية على أطراف المحول الثانوية - أطراف الحمل - ومقدارها (V_2) مما يعني نشوء تيار في الملفات الثانوية (I_2)، ووفقاً لقانون لنز فإن هذا التيار (I_2) الناشئ عن مرور فيض مغناطيسي (ϕ_1) سيُنتج فيضاً مغناطيسياً (ϕ_2) معاكساً للفيض الأصلي (ϕ_1) بالإتجاه، ليُصبح الفيض المغناطيسي المُشترك أو المُحصّل في القلب الحديدي (ϕ_m) مساوٍ للفيض المغناطيسي الإبتدائي (ϕ_1) مطروح منه الفيض المغناطيسي الثانوي (ϕ_2) أي أن هذا الفيض المُشترك (ϕ_m) سيتعرض للهبوط لحظياً كما هو مبين بالشكل (**1-4**).



الشكل رقم (**1-4**)

وبما أن قيمة الفيض المغناطيسي المُشترك أو المُحصّل (ϕ_m) تعرضت للهبوط فإن قيمة القوة الدافعة الكهربائية الناشئة في الملفات الإبتدائية ($-E_1$) سوف تتعرض للهبوط أيضاً، وذلك يعني زيادة الفولتية المُحصّلة المُطبقة على الملفات الإبتدائية ($V_1 - E_1$) مما يؤدي لزياد التيار في الملفات الإبتدائية (I_1). وهذه الزيادة في التيار الإبتدائي (I_1) سيصاحبها زيادة في قيمة الفيض المُشترك أو المُحصّل (ϕ_m) و المساوي لـ($\phi_1 - \phi_2$) نتيجة لزيادة قيمة الفيض الإبتدائي (ϕ_1)، وهذا ما يُسمى بالـ(**Transformer Action**).

ومنه يمكن القول أن الفيض المُشترك أو المُحصّل (ϕ_m) يكون ذو قيمة ثابتة في القلب الحديدي.



ملحوظة (1-1): الشرح السابق يَصلُح أن يكون جواباً لسؤال "كيف يتحسس المحول وجود حمل على أطرافه الثانوية ويقوم تلقائياً بزيادة التيار الإبتدائي والثانوي؟"

3.2 ضياعات القدرة في المحولات الواقعية

كما هو معلوم أن القدرة الفعّالة الداخلة للمحولات الواقعية (P_{in}) لا تُساوي القدرة الفعالة الخارجة منها (P_{out})، وذلك نتيجة لضياعات الدائرة الكهربائية والمغناطيسية التي تتعرض لها هذه المحولات. حيث تنقسم الضياعات داخل المحول كما هو مبين بالرسم الآتي:

ضياعات المحول
Transformer Losses

ضياعات اللاحمل
No-load Losses

ضياعات التيارات الدوامية في القلب الحديدي
Core Eddy Losses

الضياعات الهستيرية في القلب الحديدي
Core Hysteresis Losses

ضياعات الحمل
Load Losses

ضياعات الملفات
Winding Losses

ضياعات مقاومية او نحاسية
Resistive/Copper Losses

ضياعات التيارات الدوامية في الملفات
Winding Eddy Losses

ضياعات التيارات الدوارة في الموصلات المتوازية
Parallel Conductors Circulating Currents Losses

ضياعات الخزان
Tank Losses

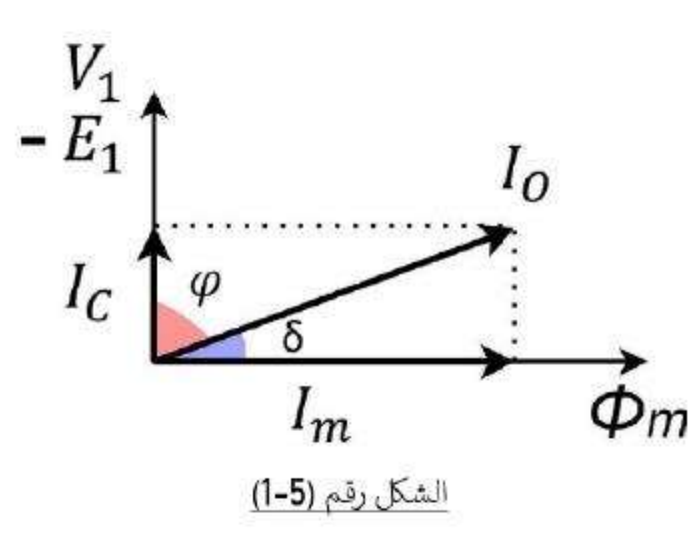
ضياعات شاردة في الهيكل
Structural Parts Stray Losses

ضياعات شاردة نتيجة للتيارات المرتفعة
Stray Losses due to High currents Leads

Stray Losses - ضياعات شاردة

- **ضياعات اللاحمل – No-Load Losses**

عند تطبيق الفولتية الإسمية بالتردد الإسمي على أطراف الملفات الإبتدائية للمحولات المثالية (**Ideal transformers**) ينشأ تيار تهييج - مغنطة - (I_m) فقط ويكون هذا التيار مسؤول عن تشكيل الفيض في القلب الحديدي أو ما يُسمى بمغنطة القلب الحديدي، ويكون مُطابق مُتجهياً **(in-phase)** للفيض المغناطيسي المُشترك **(ϕ_m)** ومُزاح مُتجهياً بمقدار **(-90°)** عن القوة الدافعة الكهربائية ($-E_1$).



الشكل رقم **(5-1)**

أما فيما يَخُص المحولات الواقعية **(Actual transformers)** فهنالك مركبة تيار أخرى تنشأ بالإضافة إلى تيار التهييج - المغنطة - (I_m) سابق الذكر وهو تيار ضياعات القدرة أو القلب **(Power/Core loss current)** أو ما يُسمى أيضاً بتيار الضياعات الثابتة **(Fixed loss current)** ويُرمز له بالرمز (I_C) ويكون مُزاح مُتجهياً بمقدار **(+90°)** عن الفيض المغناطيسي **(ϕ_m)** ومُطابق مُتجهياً **(in-phase)** للقوة الدافعة الكهربائية ($-E_1$) وذو قيمة أقل من تيار التهييج - المغنطة - (I_m) كما هو مبين بالشكل **(5-1)**، والمَجموع المُتجهي **(Vector sum)** لهاذين التيارين (I_C) و (I_m) يُساوي تيار اللاحمل أو الدائرة المفتوحة **(No-Load/Open circuit current - I_O)** والذي يكون مزاح مُتجهياً عن الفيض المُشترك **(ϕ_m)** بزاوية تُسمى زاوية الضياعات **(Loss Angle - δ)**، ومُزاح متجهياً عن القوة الدافعة الكهربائية بزاوية تُسمى زاوية الطور **(Phase Angle - φ)** ويكون أيضاً ذو قيمة قليلة إذ يتراوح مقداره **(1% - 2%)** من التيار الإسمي للمحولات الكبيرة.



ملحوظة (1-2): بالإضافة إلى مُسمى ضياعات اللاحمل **(No-load losses)** هنالك تسميات أخرى تم ذكرها مُسبقاً وهي ضياعات القلب **(Core losses)** و ضياعات القدرة **(Power losses)** و الضياعات الثابتة **(Fixed losses)** نظراً لثباتها في حالتي اللاحمل والحمل، حيث سيتم الإستعانة بمُسمى ضياعات القلب **(Core Losses)** في سياق الشرح وسيُقصد بها جميع ما سَبق من المُسميات لهذا النوع من الضياعات.



ملحوظة (1-3): هنالك مُركّبة ضياعات عادةً ما يتم إهمالها في حالة اللاحمل وهي المُركّبة الناتجة عن مقاومة ملفات المحول (I_O^2R)، وذلك نظراً لمقدار تيار اللاحمل القليل المار في هذه الملفات والذي بدوره يؤدي لضياعات داخل هذه الملفات قليلة ومُهملة.

ويُشير تيار ضياعات القلب (I_C) سابق الذِكر إلى مُركّبتين رئيسيتين من مركبات الضياعات داخل القلب الحديدي وهما:

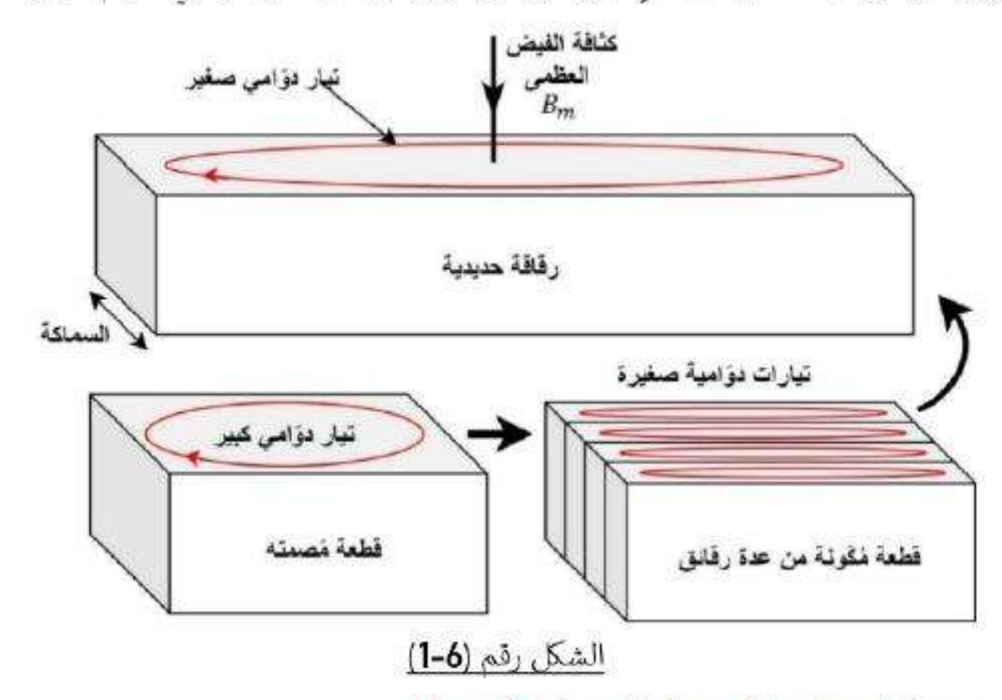
○ ضياعات التيارات الدّوّامية في القلب الحديدي - Eddy Currents Losses

وهي أولى أنوع ضياعات اللاحمل، فوفقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي والتي تَنُص على أنه " إذا تَعرض سِلك - مادة موصلة - في دائرة مُغلقة إلى فيض مغناطيسي مُتغيّر، ستنشأ فيه قوة دافعة كهربائية (**EMF** e **-**) تتناسب مع مقدار التغيُّر في هذا الفيض". ومنه فإن القلب الحديدي للمحول (**Iron core**) ما هو إلى مادة موصلة والفيض في المحول يَقطعه كما يَقطع الملفات، لذلك ستنشأ فيه قوة دافعة كهربائية وتيارات تُعرف بالتيارات الدّوّامية (**Eddy currents -** I_E) لا يُستفاد منها بل وتؤدي إلى إرتفاع درجة حرارة القلب الحديدي.

وتَعتمد قيمة هذه الضياعات على حَجم دَوّامة التيار الدّوّامي ونَوع المادة المُستخدمة في تَصنيع القلب الحديدي للمحول - مقاومة المادة لسريان التيار - وكذلك تتناسب مع قيمة تردد الفولتية المُطبقة على المحول وسُمك الرقائق المُكوِّنة للقلب الحديدي للمحول كما يَظهر بالمعادلة (**1.10**). لذلك ذهب مُصمموا المحولات إلى خفض قيمة هذه التيارات الدّوّامية وما ينتج عنها من ضياعات بواسطة الطرق التالية:

- ✓ جعل القلب الحديدي يتكون من رقائق رفيعة (**Laminations**) مُتراصة وموصولة مع بعضها على التوازي ومَعزولة فيما بينها بمادة الورنيش كما سيتم شرحه لاحقاً، مما يُقلل من حَجم الدّوّامة كما هو موضح بالشكل (**1-6**) ويُقلل من قيمة الفولتية الناتجة والتيار، وبالطبع قيمة الضياعات الناتجة عن هذه التيارات.
- ✓ إضافة عنصر السيليكون (**Silicon – Si**) إلى المادة المُكوِّنة للقلب الحديدي بِنِسَب مُعيّنة لا تتجاوز الـ(**5%**) مما يَزيد من مقاومة القلب لمرور التيار الكهربائي ويَحدّ من هذه التيارت الدّوّامية خافضاً معه قيمة الضياعات (I^2R).

وعادة ما يتم الجمع بين هاتين الطريقتين عند تصميم المحولات حتى نصل إلى قيمة ضياعات تيارات دَوّامية أقل بكثير من قيمة الضياعات الهستيرية أو ما يُسمى بضياعات التباطؤ التي سيتم شرحها.



الشكل رقم (**1-6**)

ويُمكن حساب قيمة هذه الضياعات بالإعتماد على المُعادلة التالية **[AREVA Power transformers expertise Vol.2]**:

$$P_e = k_e f^2 t^2 B_M^2 \qquad (1.10)$$

حيث:

P_e : مقدار ضياعات التيارات الدّوّامية (**Eddy current losses**) لكل كيلوجرام من الحديد (**w/kg**).

k_e : ثابت يعتمد على نوعية الحديد المُستخدم في القلب وعادة ما تتراوح قيمته من **200** إلى **1000**.

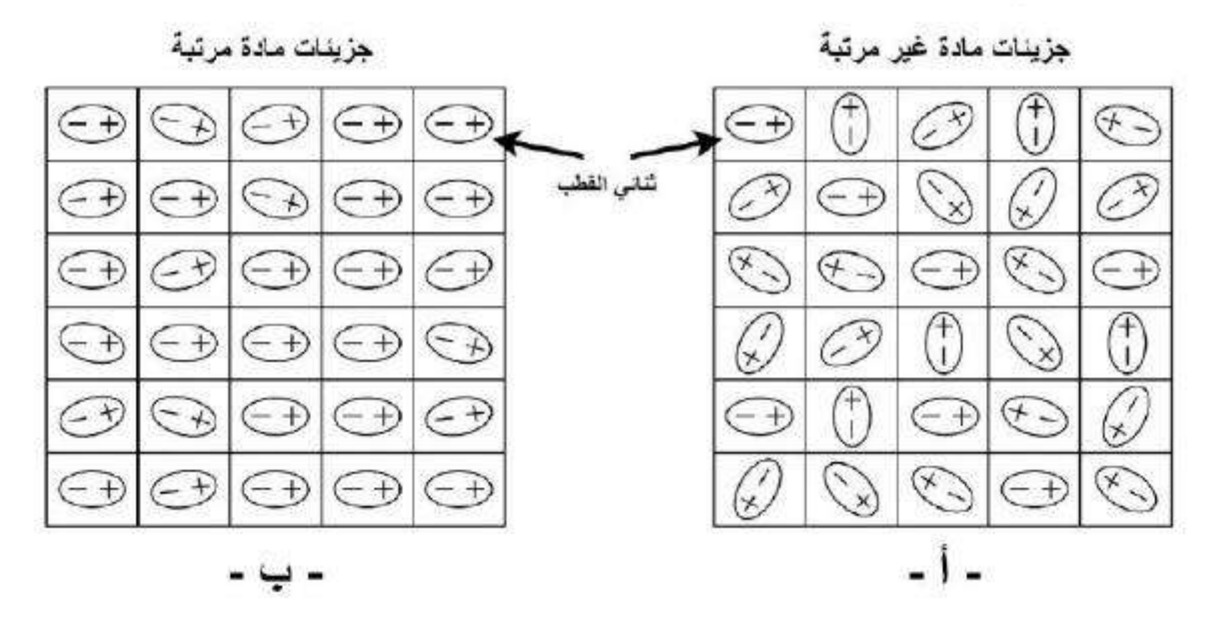
f : التردد (**Hz**).

t : سُمك الرقائق المُكوّنة للقلب الحديدي (**m**).

B_M : القيمة العُظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (**T**).

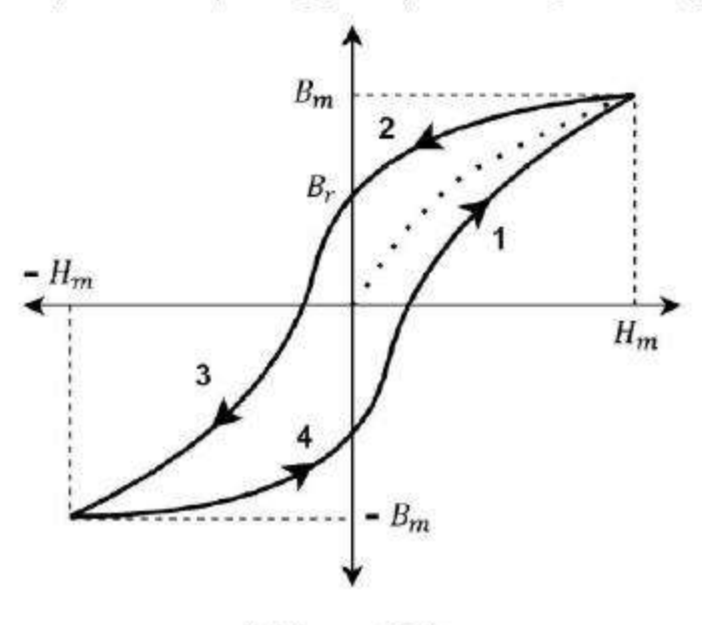
- **الضياعات الهستيرية في القلب الحديدي - Hysteresis Loss**

وهي ثاني أنواع ضياعات اللاحمل، فوفقاً لنظرية الفيزيائي الفرنسي (بيير وايس) أو ما يُسمى بنظرية الجزيئات ثُنائية القُطب في المغناطيسية الحديدية (**Domain theory in ferromagnetism**)، فإن المعادن المغناطيسية أو القابلة للمَغنطة مثل الحديد و الكوبلت والنيكل تتكون بتركيبها من جزيئات ثُنائية القُطب وتكون موزعة مُتجهياً بشكل عشوائي داخل المادة كما هو موضح في الشكل **[(1-7) (أ)]**، وعند تَعرُّض هذا المعدن لمجال مغناطيسي تقوم هذه الجزيئات بالإصطفاف بإتجاه المجال المُطبّق كما هو موضح في الشكل **[(1-7) (ب)]**.



الشكل رقم (1-7)

و بما أن التيار والفولتية المُطبقة على المحول مُتغيّرة مع الزمن فإنه عند إنعكاس إتجاه التيار و إنعكاس إتجاه المجال المغناطيسي المؤثر على جزيئات المادة، جُزء من هذه الجزيئات يُغيّر إتجاهه مع المجال الجديد الناتج من إنعكاس التيار ويَبقى جُزء بسيط على وضعيته وبحاجة إلى قدرة إضافية لتغير إتجاهه مع إتجاه المجال الجديد، وهذا ما يُسمى بالمغناطيسية المُتبقية أو (Residual magnetism) ‏(Remanence - B_r) كما هو مُوضح بمنحنى $(B-H)$ أو $(\phi - mmf)$ في الشكل **(8-1)**.



الشكل رقم (8-1)

وتُعتبر هذه القُدرة اللازمة لتغير إتجاه (إعادة ترتيب) جزيئات المادة المُكوّنة للقلب الحديدي للمحول نوع من أنواع الضياعات داخل المحولات الكهربائية وتُسمى بالضياعات الهِستيرية أو ما يُسمى بضياعات التباطؤ والتي تؤدي لإرتفاع درجة حرارة القلب الحديدي للمحول، حيث تتناسب المساحة المحصورة في الشكل **(8-1)** مع مقدار الضياعات في القدرة الناتجة عن هذه الخاصية الهِستيرية. وهذا بدوره يُفسّر تأخُر موجة الفيض المغناطيسي عن موجة الفولتية المُطبقة.

و تَعتمد قيمة هذه الضياعات على نوع المادة المُستخدمة في تصنيع القلب الحديدي للمحول و كذلك تتناسب مع قيمة تردد الفولتية المُطبقة على المحول كما يَظهر بالمعادلة **(1.11)**، لذلك ذهب مُصمموا المحولات إلى خفض قيمة هذه الضياعات بواسطة الطرق التالية:

- ✓ إضافة عنصر السيليكون **(Silicon – Si)** إلى المادة المُكوّنة للقلب الحديدي بنِسَب مُعيّنة لا تتجاوز الـ**(5%)** مما يُحسن الخصائص المِغناطيسية للمادة ويُقلل من قيمة الضياعات الناتجة عن هذه الخاصية.
- ✓ تَخليص المادة المُكوّنة للقلب الحديدي من الشوائب وخاصة عنصر الكربون.
- ✓ توجيه حُبيبات المادة المُكوّنة للقلب الحديدي **(Grain-orientation)** والتي سيتم الحديث عنها لاحقاً.

ويُمكن حساب قيمة هذه الضياعات بِدقة للترددات **(50 & 60 Hz)** هيرتز بالإعتماد على المعادلة التالية الواردة في **[AREVA Power transformers expertise Vol.2]**:

$$P_h = k_h \, f \, B_M^n \qquad (1.11)$$

حيث:

P_h : مقدار الضياعات الهستيرية لكل كيلوجرام من الحديد (**w/kg**).

k_e : ثابت يعتمد على نوعية الحديد المُستخدم في القلب ومقدار كثافة الفيض المغناطيسي وعادة ما تتراوح قيمته من $3\ x\ 10^{-3}$ إلى $20\ x\ 10^{-3}$.

f : التردد (**Hz**).

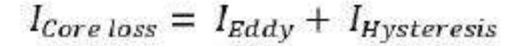
B_M : القيمة العُظمى لكثافة الفيض المغناطيسي (**T**).

n : الأس وتكون قيمتة بين **0.5** و **2.3** حسب نوعية الحديد المُستخدم في القلب ومقدار القيمة العظمى لكثافة الفيض المغناطيسي وعادة ما تكون قيمته محصورة بين (**1.5T – 2T**) تسلا.

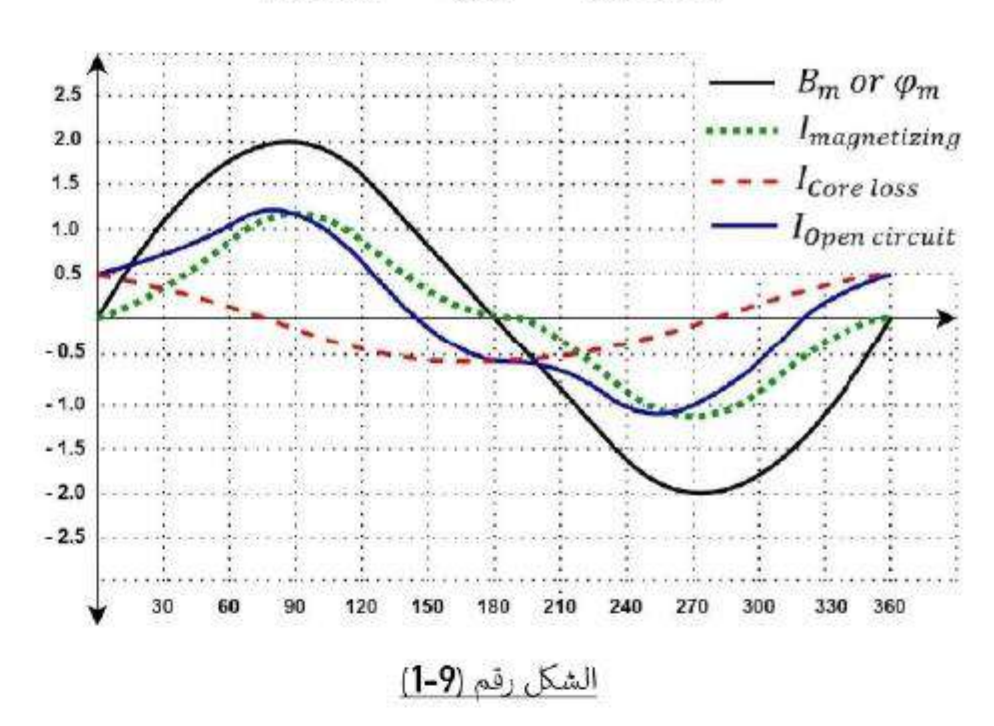
ومنه فإنه في حالة اللاحمل (**No-Load**) وعند تطبيق فولتية مُترددة على أطراف المحول الواقعي الإبتدائية، سينشأ تيار يُعرَف بتيار اللاحمل (**No-Load/Open circuit current -** I_O) يتكون من مُركبتين كما هو مُبين بالمعادلة التالية:

$$I_{Open\ circuit} = I_{magnetizing} + I_{Core\ loss}$$

حيث أن:



$$I_{Core\ loss} = I_{Eddy} + I_{Hysteresis}$$



الشكل رقم (**1-9**)



ملحوظة (1-4): يُمكن ملاحظة أن تيار اللاحمل (**No-Load/Open circuit current -** I_O) ذو موجة غير جيبية كما هو مبين بالشكل (**1-9**).

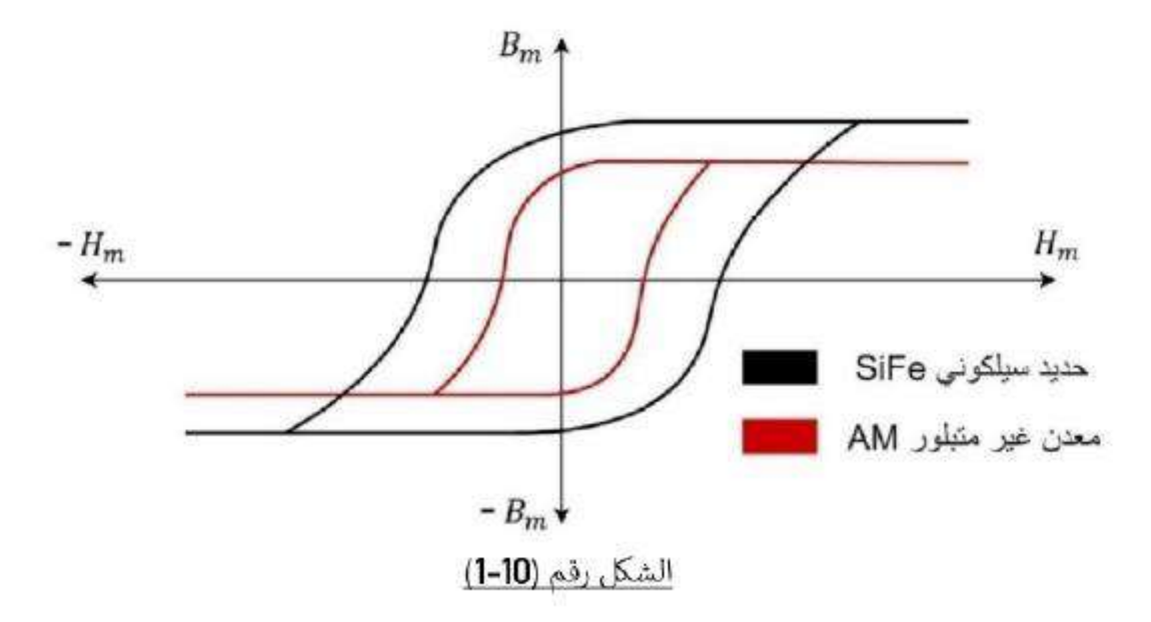


ملحوظة (5-1): تُشكل نِسبة الضياعات الهستيرية إلى ضياعات التيارات الدَوّامية ما مِقداره **(40:60)** في الحديد السيليكوني التقليدي، وما قداره **(28:72)** للحديد عالي النفاذية **(Hi-B)**.

بالرغم مما تم شرحه من ضياعات في حالة اللاحمل فإن هذه الضياعات تبدو صغيره نسبياً حيث أن كفاءة المحولات الكهربائية تتراوح بين **(99% - 95%)** بالمئة وهي نسبة مرتفعة!!!، إلا أن العدد المَهول لهذه المحولات في المنظومة الكهربائية جعل لهذه الضياعات قيمة كبيرة لا يُمكن إهمالها وكذلك جعل من تحسين كفاءة المحولات أمر ذو أهمية قصوى، حيث تَبلغ قيمة ضياعات القلب **(Core losses)** ما مقداره **(5%)** بالمئة من إجمالي ما يتم توليدُه من قُدرة كهربائية وهو مقدار كبير جداً!!!. و بالعودة لدراسة حول هذا الموضوع أُجريت في عام **1988** في بريطانيا وُجِدَ أن هذا النوع من الضياعات **(Core losses)** لذلك العام أدى لخسائر مادية قُدّرت بـ**(110)** مليون جنيه استرليني!!!.

لذلك ترنو الكثير من الشركات المُصنّعة للمحولات وخاصة الشركات الكبرى إلى تحسين كفاءة هذه المحولات كشركة **(ABB)** التي ذهبت إلى إستبدال المادة المُستخدمة في تكوين القلب الحديدي للمحول لمواد ذات ضياعات أقل مثل إستخدام المعدن غير المُتبلور **(Amorphous Metal - AM)** عِوضاً عن الحديد السيلكوني **(Silicon Steel - SiFe)** الذي يُعتبر الأكثر شيوعاً كمادة مُكوّنة للقلب الحديدي لمحولات التوزيع مما يُقلل من قيمة ضياعات القلب بنسبة تصل لـ**(70%)** كحد أقصى.

الشكل **(10-1)** يُوضح مُنحنى **(B – H)** لمحولين أحدهما ذو قلب من الحديدي السيليكون التقليدي والآخر ذو قلب من معدن غير متبلور، حيث يُمكن مُلاحظة الإختلاف في الخاصية الهستيرية من معدن لآخر مما يَعني ضياعات أقل.



الشكل رقم **(10-1)**

- **ضياعات الحمل – Load Losses**

إن التيار المار بملفات المحول نتيجة وصله بحمل يؤدي إلى ظهور قدرة ضائعة على شكل حرارة، حيث تنقسم هذه القُدرة الضائعة إلى ضياعات مادية أو نحاسية (**Resistive or Copper losses -** I^2R) ناتجة عن قيمة مقاومة الملفات (**DC resistance**) وضياعات شاردة (**Stray losses**) كالضياعات الناتجة عن التيارات الدَوّامية بالملفات (**Eddy currents losses**) وضياعات التيارات الدَوّارة في الموصلات المتوازية (**Parallel Conductors Stray losses**) والضياعات الشاردة في الأجزاء الهيكلية المُكوِّنة للمحول (**Structural Parts Stray losses**)، حيث سيتم شرحها تباعاً كالآتي:

- **ضياعات الملفات – Winding Losses**

- **الضياعات المادية أو النحاسية – Resistive or Copper Losses –** I^2R

عند مرور تيار في ملفات المحول وتبعاً لقيمة مقاومة الملفات (**DC resistance**) تظهر ضياعات تسمى الضياعات المادية أو النحاسية (**Resistive or Copper losses**) و تكون قيمة هذه الضياعات قرابة الـ(**95% - 85%**) بالمئة من قيمة ضياعات الحمل (**Load losses**)، كما ويَعتمد مقدار هذا النوع من الضياعات على مربع قيمة التيار بالإضافة إلى قيمة مقاومة الملفات وفقاً للمعادلة التالية[**AREVA Power transformers expertise Vol.2**]:

$$P_r = I^2 R_w \quad (1.12)$$

حيث;

P_r : قيمة الضياعات المادية أو النحاسية (**W**).

I : التيار المار بالملفات (**A**).

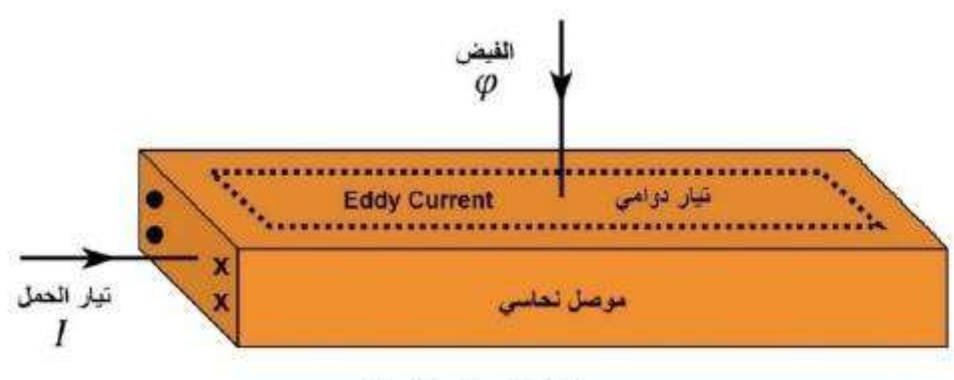
R_w : قيمة مقاومة التيار الثابت للملفات – **DC resistance** (Ω).

والوسيلة الوحيدة لخفض قيمة هذه الضياعات هي بتقليل مقاومة الملفات ويتم ذلك بجعل الموصلات ذات مقطع عرضي أكبر بقدر مُعيّن، وذلك لأن جعل الموصلات ذات مقطع عرضي كبير قد يؤدي لضياعات نحاسية غير مرغوب بها، لذلك يَلجأ مُصمموا المحولات إلى التقليل من طول الملفات بغرض الحصول على مقاومة كهربائية أقل ومنه خفض قيمة الضياعات الناتجة عنها.

- **ضياعات التيارات الدَوّامية بالملفات - Winding Eddy Currents Losses**

إن الفيض المُتسرب داخل المحول يؤدي إلى ظهور تيارات دُوّامية (**Eddy currents**) داخل ملفات المحول محدثاً ضياعات تُسمى بالـ(**Eddy currents losses**) أو (**Foucault losses**) كما هو مُبين بالشكل (**1-11**)، حيث يُمكن حساب قيمة هذه الضياعات ولكن بشكل مُعقد وذلك يعود

لإختلاف قيمة هذه الضياعات وفقاً لكثافة الفيض المغناطيسي المُتسرب وزاويته اللذان يعتمدان على موقع هذه الملفات.

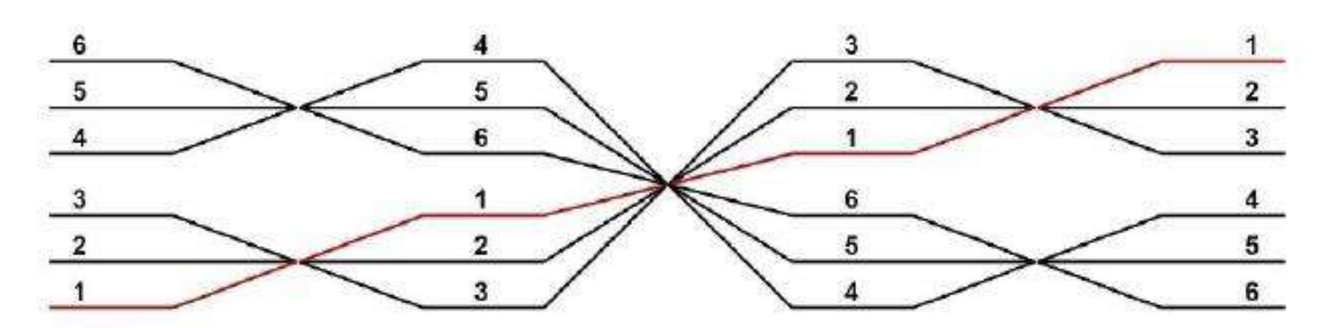


الشكل رقم (1-11)

- **ضياعات التيارات الدّوّارة في الموصلات المتوازية - Parallel Conductors Stray Losses**

كما تم شرحه سابقاً أن كل جزء من الملفات يتعرض لمِقدار مُعيّن من الفيض التسرُبي يختلف عن باقي أجزاء الملف وفقاً لموقعه في المحول، وبناءاً عليه فإن الموصلات المتوازية المُكوّنة للملفات تتعرض لمقدار مُتغيّر من الفيض التسرُبي وهذا يعني مِقدار مُتغيّر من فولتية الحث سينشأ في هذه الموصلات، وتبعاً لهذا الإختلاف في الفولتية سينشأ تيار دَوّار بين هذا الموصلات المُتوازية (**Circulating current**) من شأنه عمل ضياعات تؤدي لإحماء إضافي لهذه الملفات.

وللحد من قيمة هذه الضياعات يُمكن عمل تبديل بين مواقع هذه الموصلات المتوازية (**Transposition**) لتتعرض لنفس الفيض التسرُبي مما يَحُد من مرور هذه التيارت الدّوّارة (**Circulating currents**).



الشكل رقم (1-12)

حيث يُوضح الشكل (**1-12**) أحد طرق عمل تبديل بين موصلات ملفات المحولات (**Transposition**) للتغلب على ظاهرة التيارات الدّوّارة داخل هذه الموصلات المتوازية.

○ ضياعات الخزان – Tank Losses

▪ ضياعات شاردة في الأجزاء الهيكيلية - Structural Parts Stray Losses

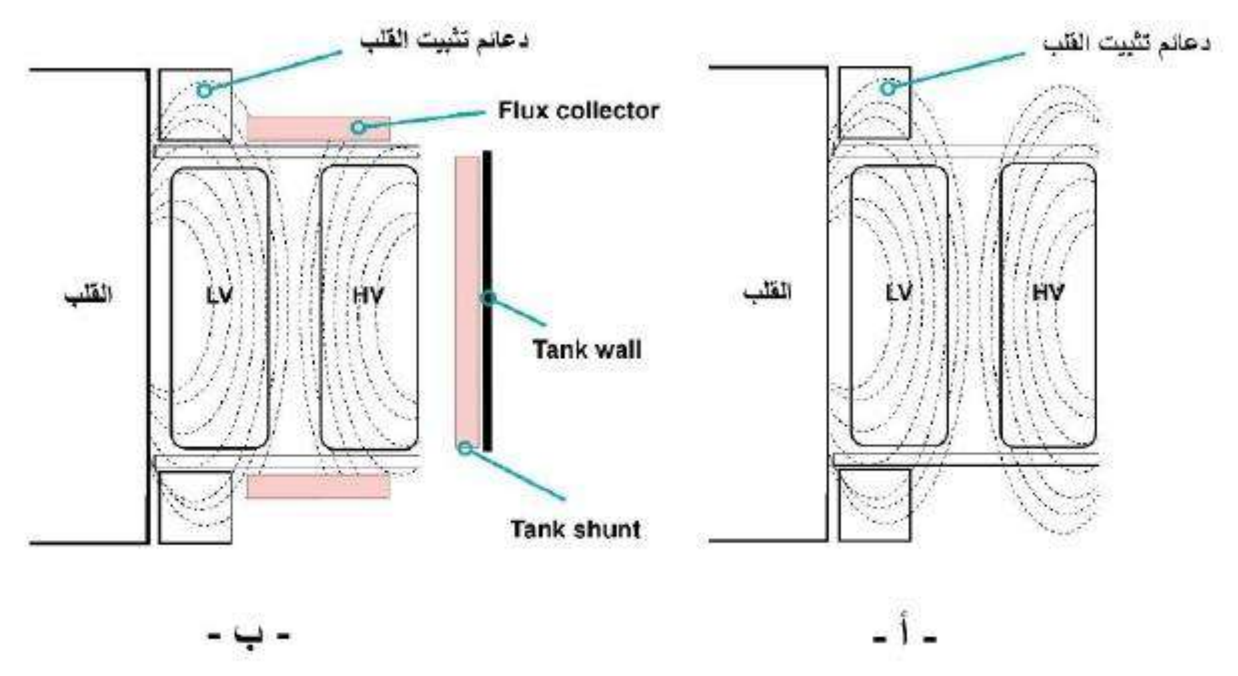
الأجزاء الهيكيلية المعدنية المُكوّنة للمحول مثل جُدران خزان المحول وغِطاؤه و دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي (**Core clamp**) وغيرها من الأجزاء تتعرض للفيض المغناطيسي المُتسرب وما ينتج عنه من حث كهرومغناطيسي كما هو الحال بملفات المحول، وهذا بدوره يؤدي لنشوء تيارات دَوّامية (**Eddy currents**) في هذه الأجزاء الهيكلية للمحول والتي من شأنها عمل إحماء لهذه الأجزاء والمشاركة في قيمة الضياعات الكُليّة.

▪ ضياعات شاردة ناتجة عن الأطراف التي تحمل تيارات عالية - Stary Losses due to High Current Leads

تنشأ هذه الضياعات في الأجزاء الهيكيلية القريبة من نقاط التوصيل التي يَمر من خِلالها تيارات عالية مثل نقطة إلتقاء الملفات بموصلات عوازل الإختراق أو كما تُسمى جُلَب المحولات (**Transformer bushings**)، حيث يَكون المجال المغناطيسي ذو قيمة مُرتفعة عند نقاط التوصيل مما يؤدي إلى ظهور تيارات دَوّامية (**Eddy Currents**) في الأجزاء الهيكيلية القريبة من هذه النقاط كما ذُكر سابقاً.

لذلك وللتخلص من هذا النوع من الضياعات (**Tank losses**) يتم اللجوء إلى واحدة أو أكثر من هذه الحلول التي تنحصر بـ:

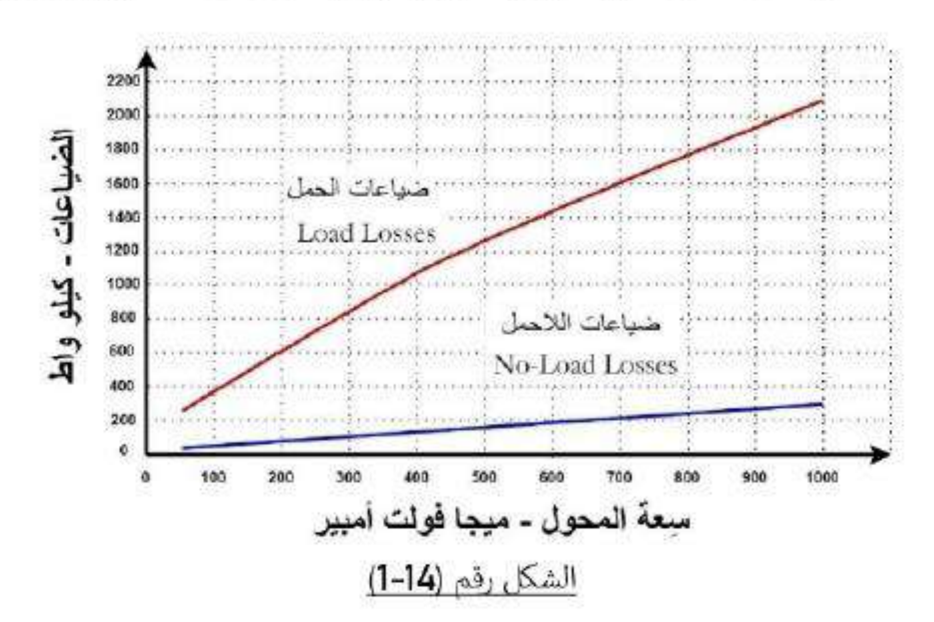
- ✓ إختيار مادة مناسبة لهذه الأجزاء الهيكيلية المعدنية وخاصة القريبة من نقاط التوصيل التي يَمُر من خلالها تيارات مرتفعة مثل إستخدام الحديد غير المغناطيسي (**Non-magnetic steel**) عوضاً عن إستخدام الحديد المغناطيسي (**Magnetic mild steel**).
- ✓ إستخدام تصميم مناسب لهذه الأجزاء الهيكلية، حيث يُؤثر تصميم الأجزاء الهيكلية الداخلية للمحول بشكل كبير في الحد من هذه الضياعات. كما ويُمكِن الإستعاضة عن بعض أجزاء دعائم تثبيت القلب الحديدي (**Core clamp**) والتي لا تتعرض لقوى ميكانيكية كبيرة بمواد عازلة بدلاً من المواد المعدنية.
- ✓ التحكم والحد من كمية الفيض المُتسرب في المحول وذلك بإستخدام دروع كهرومغناطيسية واقية (**Electromagnetic shields**) أو ما يُسمى بالـ(**Flux rejector**) و أيضاً يُمكن إستخدام الـ(**Magnetic shunt**) أو ما يُسمى بالـ(**Flux collector**) و ذلك للحد من وصول الفيض المتسرب للأجزاء الهيكلية المعدنية المُكوِّنة للمحول كما هو مبين بالشكل [(**1-13**) (ب)] ويكون مؤرض بنقطة واحدة مع خزان المحول.



الشكل رقم (1-13)

وهذه الضياعات الشاردة (**Stray losses**) يَصعُب إيجاد قيمتها حسابياً، لذلك يتم اللجوء للخطوات التالي لمعرفة قيمتها التقديرية:

- ✓ قياس قيمة الضياعات الكُلية أثناء مرور تيار الحمل (**Load losses**).
- ✓ ثم قياس قيمة مقاومة ملفات المحول (**Winding DC resistance**) ومنها يُمكن حساب قيمة الضياعات المادية أو النحاسية (I^2R) بحيث تكون قيمة هذه الضياعات قرابة الـ(**95% - 85%**) من قيمة ضياعات الحمل (**Load losses**).
- ✓ ثم يتم طرح قيمة الضياعات المادية أو النحاسية (I^2R) من قيمة ضياعات الحمل الكلية المُقاسة (**Load losses**)، وذلك للحصول على قيمة الضياعات الشاردة (**Stary losses**) وعادة ما تكون قيمة هذه الضياعات الشاردة قرابة الـ(**15% - 5%**) من قيمة ضياعات الحمل (**Load losses**).



الشكل رقم (1-14)

يُبين الشكل (**14-1**) المِقدار النموذجي (**Typical**) لضياعات المحول في حالتي الحمل واللاحمل وفقاً لسعة المحول بالميجا فولت أمبير.

وبذلك نكون قد أحطنا قدر الإمكان بالضياعات الخاصة بالمحول الواقعي (**Actual transformer**) و يُمكن رسم الدائرة المكافئة له وفهم الإختلاف بينها وبين نظيرتها للمحول المثالي (**Ideal transformer**).

4. الدائرة المُكافئة للمحول

عند رسم الدائرة المُكافئة للمحولات الكهربائية الواقعية (**Actual transformer**) يجب أخذ ضياعات القُدرة سابقة الذكر بعين الإعتبار، حيث يتم تعويض كل نوع من هذه الضياعات بعنصر في الدائرة المُكافئة وفقاً للإعتبارات التالية:

- ✓ **الضياعات المادية أو النحاسية – Resistive or Copper Losses**

تتناسب قيمة هذه الضياعات مع مُربع قيمة التيار المار في الملفات (I^2R)، لذلك أسهل الطرق لتمثيل هذه الضياعات التي تؤدي لإحماء مادي لملفات المحول الإبتدائية والثانوية هي على شكل مقاومة مادية (R_1 و R_2) على التوالي مع مصدر الفولتية في الدائرة المُكافئة.

- ✓ **ضياعات التيارات الدّوّامية - Eddy Currents Losses والضياعات الهستيرية - Hysteresis Loss**

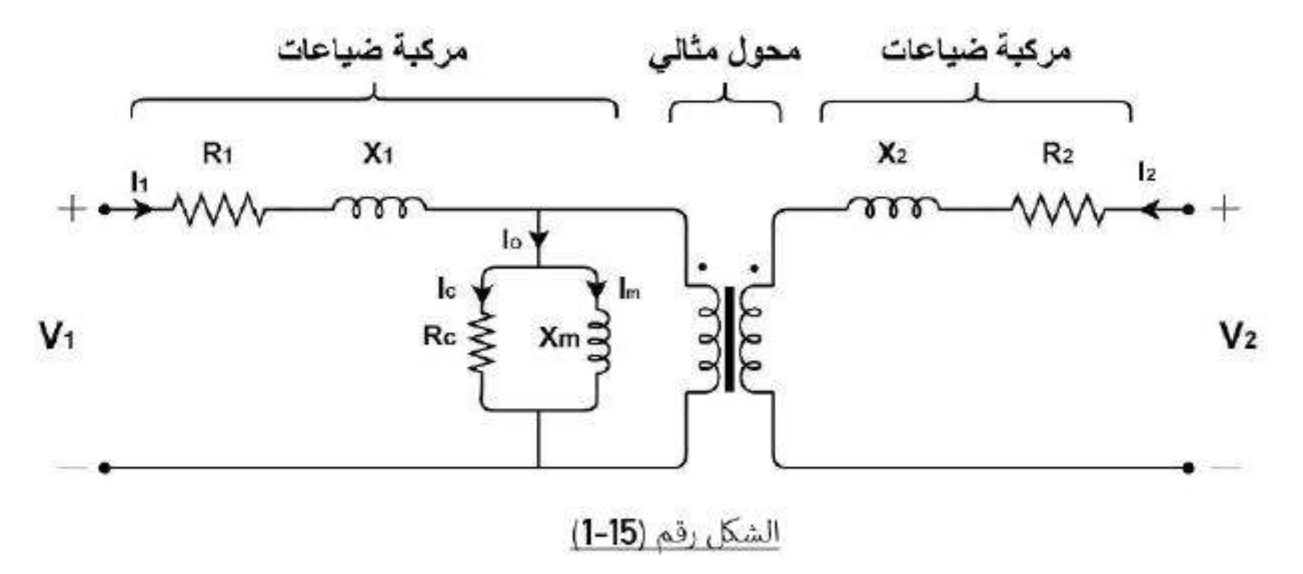
تتناسب قيمة هذه التيارات والضياعات الناتجة عنها في القلب الحديدي مع قيمة الفولتية المُطبّقة، لذلك يتم تمثيل هذه الضياعات على شكل مقاومة مادية (R_C) على التوازي مع مصدر الفولتية في الدائرة المُكافئة على الطرف الإبتدائي للمحول فقط.

- ✓ **ضياعات الفيض المُتسرب - Leakage Flux Losses**

يتم تمثيل هذه الضياعات تبعاً لنوعها وعلاقتها بالفولتية والتيار المُطبق على شكل مفاعلة حثية (**Reactance** – X_1 و X_2) في الدائرة المكافئة للملفات الإبتدائية والثانوية للمحول.

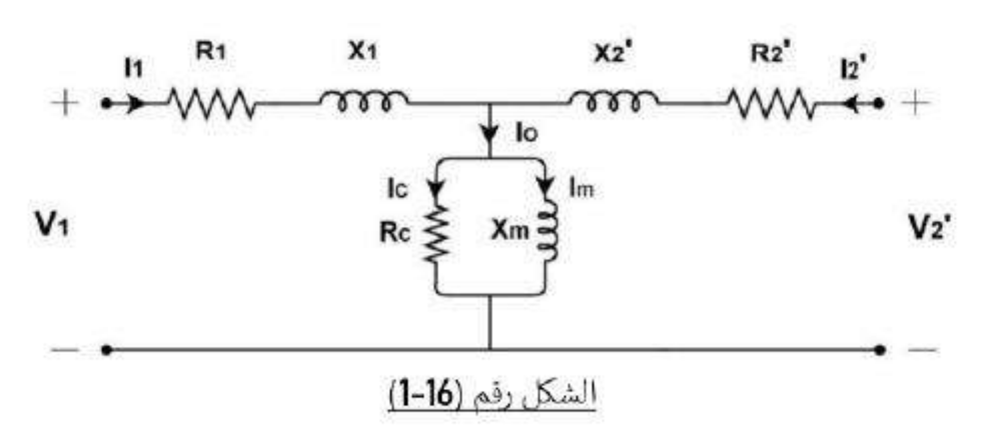
- ✓ **تيار التهييج أو المغنطة للمحول – Excitation or Magnetization Current**

تتناسب قيمة هذا التيار مع الفولتية المُطبقة على أطراف الملف الإبتدائي ويكون مُزاح مُتجهياً بمقدار (**-90°**) عن الفولتية، لذلك يتم تمثيله على شكل مُفاعلة حثية (X_m) على التوازي مع المقاومة المادية (R_C) لتصبح الدائرة المُكافئة كالتالي:



الشكل رقم (1-15)

ولتبسيط الدائرة المُكافئة وإزالة المحول المثالي من الرسم هنالك طريقتين؛ **الطريقة الأولى** بِنسب مُركبات ضياعات الدائرة الثانوية إلى الإبتدائية وهو ما يُسمى بالإنجليزية **(Referred to primary)** و**الطريقة الثانية** بِنسب مُركبات ضياعات الدائرة الإبتدائية إلى الثانوية **(Referred to secondary)**. وكمثال يُمكن ملاحظة الشكل **(1-16)** والذي يُوضح عملية نسب مُركبات ضياعات الثانوية للدائرة الإبتدائية مما يُسهل التعامل مع هذه الدائرة كهربائياً.



الشكل رقم (1-16)

ويكون التبسيط وفقاً للمعادلات التالية:

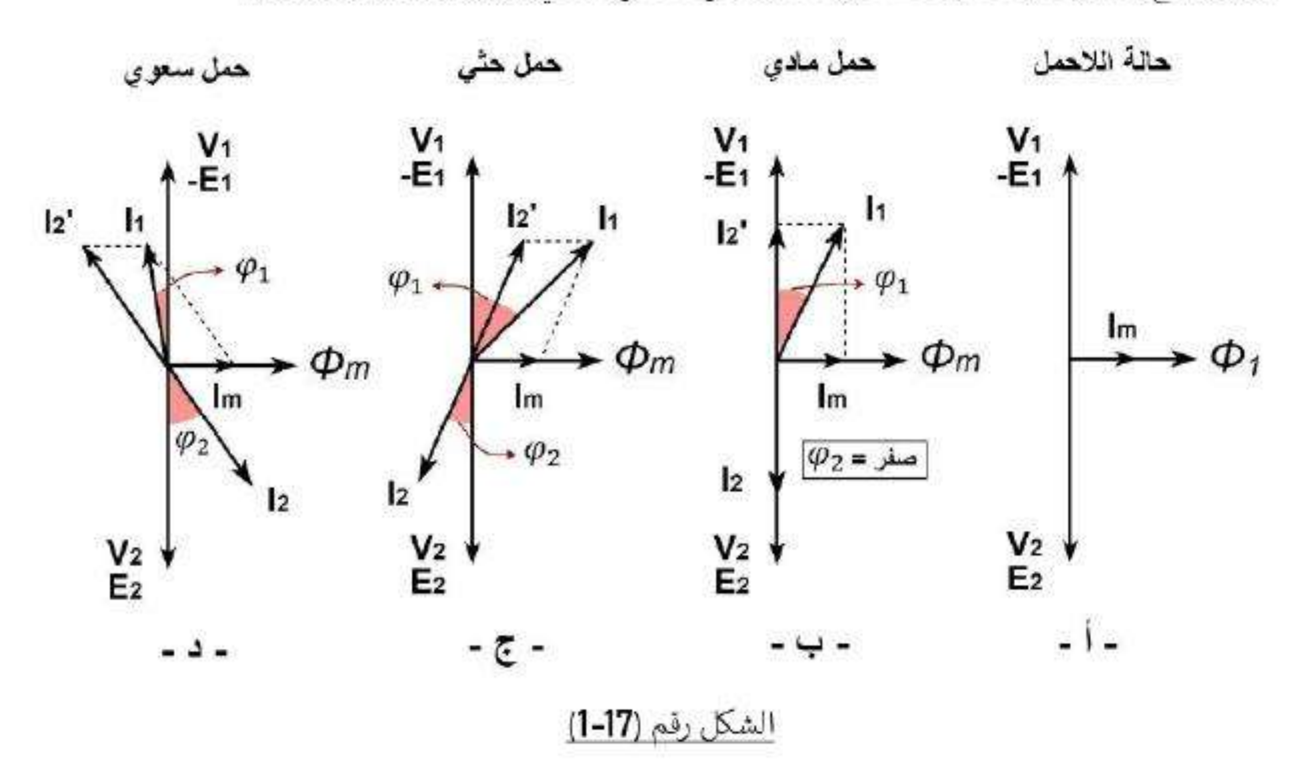
$$X_2' = a^2 X_2$$
$$R_2' = a^2 R_2$$
$$V_2' = a\, V_2$$
$$I_2' = \frac{I_2}{a} \qquad (1.13)$$

حيث:

$$a = \frac{V_1}{V_2} \qquad (1.14)$$

ولزيادة الفهم يُمكن تمثيل فولتيات وتيارات الدائرة المُكافئة وكذلك تأثير الضياعات عليها بإستخدام المُخططات المُتجهية (**Phasor diagrams**).

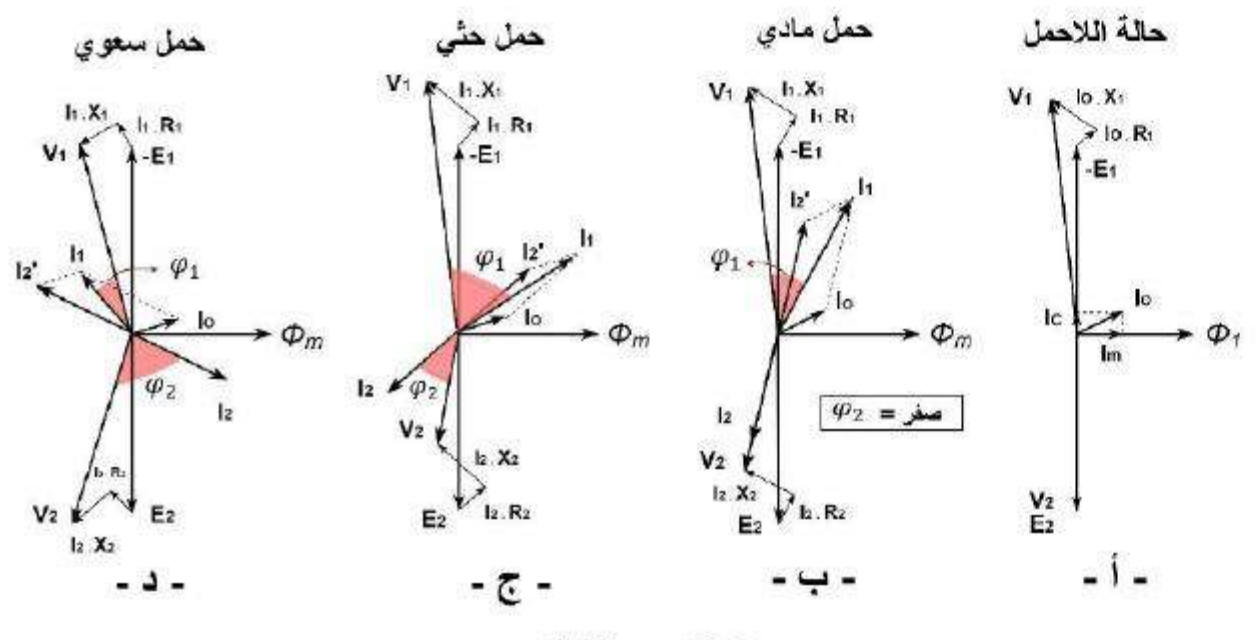
الشكل [(**1-17**) (أ)] يُمثل مُخطط مُتجهي (**Phasor diagram**) لمحول مثالي (**Ideal transformer**) آحادي الطور نسبة تحويله **1:1** في حالة اللاحمل (**No-load**)، و الأشكال [(**1-17**) (ب و ج و د)] توضح المُخطط المُتجهي (**Phasor diagram**) لنفس المحول في حالة وصل دائرته الثانوية تارة بحمل مادي (**Resistive Load**) و تارة بحمل حِثي (**Inductive load**) و تارة أُخرى بحمل سَعوي (**Capacitive load**) مع إهمال تأثير الضياعات على الدائرة لكونه محول مثالي (**Ideal transformer**).



الشكل رقم (**1-17**)

حيث يظهر بالشكل (**1-17**) إهمال تأثير مقاومة الملفات (R_1 و R_2) والمفاعلة الحثية (X_1 و X_2) الناتجة عن الفيض المُتسرب والتي تأثر على قيمة الفولتية المُتولدة (**Induced voltage**)، بالإضافة إلى إهمال تيار القلب (I_C) أو ما يُسمى بتيار ضياعات القلب والناتج عن التيارات الدَوّامية والخاصية الهستيرية في القلب الحديدي والذي يؤثر على قيمة التيار الإبتدائي (I_1).

أما فيما يُخص المحولات الواقعية (**Actual transformers**) فيجب مُراعاة تأثير مُركبات الضياعات على الدائرة الإبتدائية والثانوية عند رسم المُخطط المُتجهي (**Phasor diagram**)، حيث يُمثل الشكل (**1-18**) المُخطط المُتجهي لمحول واقعي (**Actual transformer**) آحادي الطور نسبة تحويله **1:1** في حالة اللاحمل (**No-Load**) و كذلك في حالة وصله بأحمال مختلفة (مادية و حِثية و سَعوية).



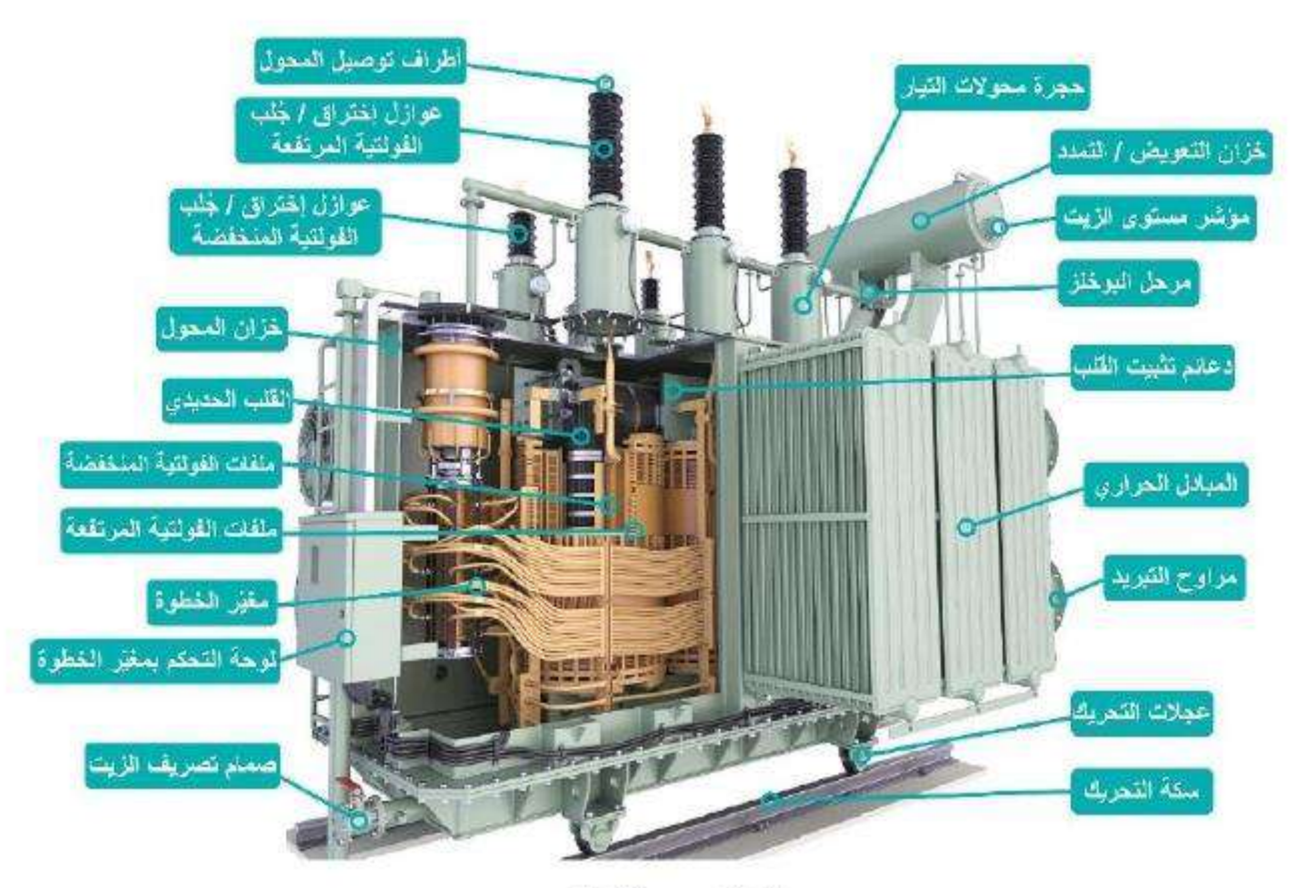
الشكل رقم (1-18)

ومن الشكل (**1-18**) يُمكن ملاحظة ان مُعامل القدرة (**Power Factor – PF**) الخاص بالمحول يعتمد بشكل كُلي على طبيعة الحمل الموصول على أطراف المحول الثانوية، وهذا يُفسّر عدم ذكر أية قيمة لمُعامل القدرة على لوحة البيانات (**Nameplate**) الخاصة بالمحول حيث لا يُمكن التنبؤ بالحمل الذي سيتم وصله بالمحول فيما إذا كان حمل مادي أو حِثي أو سَعوي.

5. تركيب المحولات الكهربائية

بعد الإنتهاء من شرح مبدأ عمل المحول نظرياً لا بُدَّ لنا من شرح مُكونات المحولات الكهربائية المغمورة بالزيت والتي تتمثل بالأجزاء التالية:

5.1 Main Tank	**5.1** الخزان الرئيسي
5.2 Active Part	**5.2** الجزء الفعال
• Iron Core	• القلب الحديدي
• Windings	• الملفات
• Core Clamp	• دعائم التثبيت
5.3 Tap Changer	**5.3** مُغيّر الخطوة
5.4 Insulation System	**5.4** نظام العزل
5.5 Transformer Oil	**5.5** زيت المحول
5.6 Cooling System	**5.6** نظام التبريد
5.7 Bushings	**5.7** عوازل الإختراق أو الجُلَب
5.8 Accessories	**5.8** أجزاء مُساعدة



الشكل رقم (1-19)

5.1 الخزان الرئيسي - Main tank

الخزان الرئيسي للمحول هو ذلك الخزان أو الوعاء المُغلق الذي يَحوي بداخله القلب الحديدي والملفات وكذلك زيت المحول وعادة ما يكون مستطيل الشكل، حيث تكمن وظيفته بالنقاط التالية:

- ✓ تأمين الحماية الميكانيكية اللازمة لما يَحويه بداخله من أجزاء - قلب وملفات - أو كما تُسمى بالأجزاء الفعالة (**Active parts**) أثناء عملية النقل أو أثناء التشغيل الطبيعي للمحول.
- ✓ إحتواء الزيت الخاص بالمحول تحت الضغط التشغيلي دون حدوث أي تسريب لهذا الزيت.
- ✓ إعطاء المقاومة الكافية أمام فحصي إنخفاض وإرتفاع الضغط (**Vacuum and Over pressure tests**) في طور التصنيع، حيث يصل الضغط أثناء فحص إنخفاض الضغط (**Vacuum test**) إلى قرابة الـ (**1 mbar**) ملي بار أو أقل من ذلك، أما أثناء فحص إرتفاع الضغط (**Over pressure test**) قد يصل إلى (**0.35 bar**) بار فوق الضغط التشغيلي.

ويتكون الخزان من صفائح معدنية من الـ(**Mild steel**) المقوى ذو السُمك المناسب، وكما ذُكر سابقاً فإن خزان المحول يَقع في مرمى الفيض المتسرب من القلب الحديدي مما يَعني تكوّن تيارات دَوّامية تؤدي لإحماء هذا الخزان، مما دفع مُصمموا المحولات إلى إستخدام مادة الألمنيوم أو الحديد غير المغناطيسي (**Non-magnetic steel**) في تصنيع الخزان وذلك للحد من تكون هذه التيارات الدَوّامية وما ينشأ عنها من ضياعات ونقاط إحماء.

- **أنواع الخزانات الرئيسية للمحول**

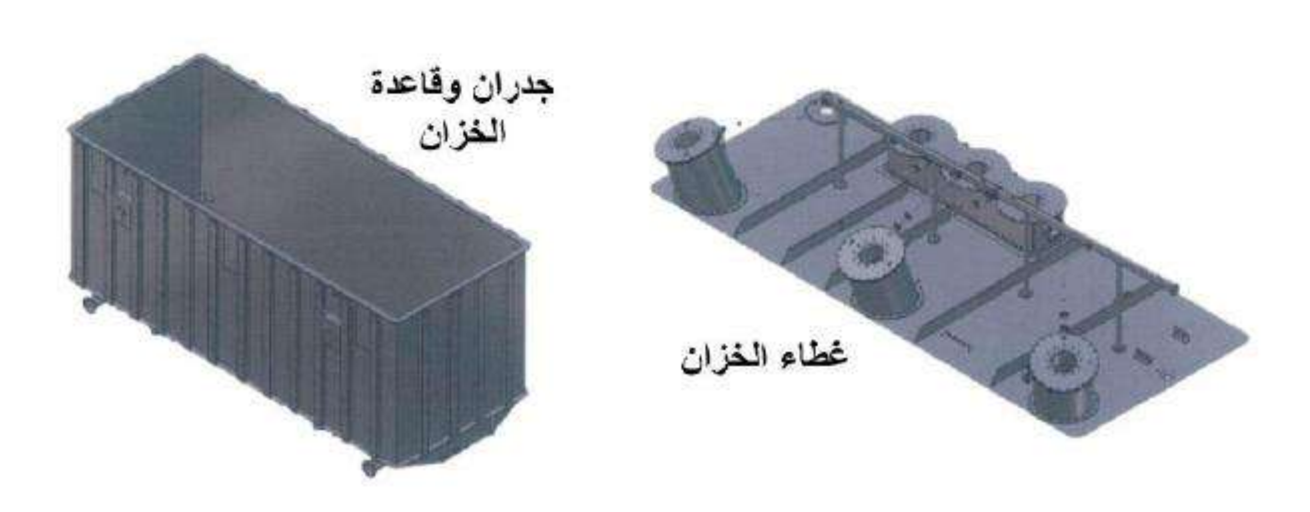
تنقسم الخزانات الرئيسية للمحولات وفقاً لعدة معايير كطريقة التجميع وكذلك نمط التواصل بين وسط العزل الداخلي والمحيط الخارجي للمحول كالآتي:

- **حسب طريقة التجميع**

يتكون الخزان عادة من قطعتين رئيسيتين توصلان ببعضهما بواسطة البراغي أو اللحام وتنقسم المحولات من حيث تصميم هاتين القطعتين إلى ثلاثة أقسام رئيسية شائعة الإستخدام:

- **خزان ذو حافة تثبيت علوية - High flange tank design**

يتم إستخدام هذا التصميم عادة للمحولات الكبيرة، حيث يتكون الخزان في هذه الحالة من قطعتين و هما غطاء الخزان العلوي والقطعة الثانية هي قاعدة الخزان والجدران معاً كما هو مبين في الشكل **(1-20)**، و يتم وصل هاتين القطعتين بواسطة البراغي أو اللحام كما ذكرا سابقاً. حيث يُعتبر هذا النوع الأكثر شيوعاً.



الشكل رقم (1-20)

- **خزان ذو حافة تثبيت سفلية - Low flange tank design**

يتم إستخدام هذا التصميم عادة للمحولات الصغيرة، حيث يتكون الخزان في هذه الحالة من قطعتين و هما القاعدة والقطعة الثانية هي جدران و غطاء الخزان العلوي معاً كما هو مبين في الشكل **(1-21)**، و يتم وصل هاتين القطعتين بواسطة البراغي أو اللحام كما ذُكر سابقاً.



الشكل رقم (1-21)

- **خزان ذو قلب مُعلّق بالغطاء - Cover hung design:**

يتم إستخدام هذا التصميم عادة للمحولات الصغيرة، ويكون تصميم هذا النوع مُطابق للنوع ذو الحافة العلوية (**High flange tank**) والموضح بالشكل (**1-20**)، بحيث يكون القلب الحديدي والملفات - الجزء الفعال - متصل بغطاء الخزان العلوي. ويُعتبر هذا النوع الأكثر شيوعاً لمحولات التوزيع.

- **حسب نمط التواصل بين وسط العزل الداخلي والمحيط الخارجي للمحول**

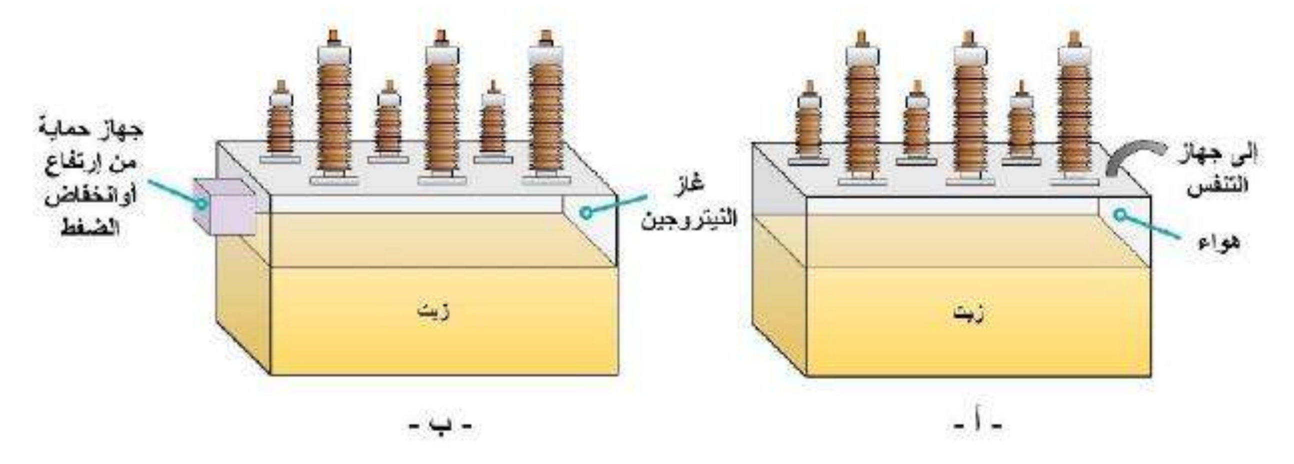
يُمكن تقسيم الخزانات الرئيسية للمحولات تبعاً لنمط التواصل بين وسط العزل الداخلي وهو الزيت في غالب الأحيان و المحيط الخارجي للمحول كالآتي:

- **نظام الخزان المفتوح على الهواء الجوي – Open to Atmosphere or Free Breathing Tank System**

لا يحتوي هذا النوع على خزان تعويض أو تمدد (**Conservator tank**)، بحيث يحتوي الخزان على زيت المحول بالإضافة إلى مساحة أعلى الزيت تكون مملوءة بالهواء المفتوح على الهواء الجوي الخارجي كما هو مبين في الشكل [**(1-22) (أ)**]، وتكون حركة الهواء من وإلى الخزان عبر أنبوب التنفس في حال الإختلاف الطبيعي لحجم الزيت نتيجة لتغيُّر حرارة هذا الزيت بسبب إختلاف حمل المحول أو درجة حرارة الجو المحيطة، وتكون مُقدمة أنبوب التنفس مُتجهة لأسفل منعاً لدخول مياه الأمطار كما ويُمكن وضع شبك معدني على مقدمة هذا الأنبوب لمنع دخول الملوثات الصلبة إلى خزان المحول وأيضاً يُمكن إضافة مادة لإمتصاص الرطوبة من الهواء الداخل للمحول كمادة السليكا جل وذلك بوضعها بوعاء عادة ما يكون زجاجي وتثبيته بمقدمة أنبوب التنفس. ويُعتبر هذا التصميم من التصاميم القديمة للخزانات الرئيسية للمحولات ومن سيئاته إمكانية دخول الهواء الرطب والشوائب لخزان المحول مما يؤثر على خصائص الزيت وكذلك يؤدي لتسارع تدهور المادة العازلة الصلبة خاصة ذات الأساس السيليلوزي.

- نظام الخزان المعزول أو المضغوط – Sealed or Pressurized Tank System

لا يحتوي هذا النوع على خزان تعويض أو تمدد (Conservator tank)، بحيث يكون الخزان معزول كلياً عن البيئة المحيطة ويحتوي على زيت المحول بالإضافة إلى مساحة أعلى الزيت تكون مملوءة بغاز النيتروجين الخامل والجاف بضغط أعلى بمقدار بسيط من الضغط الجوي مما يَحول دون دخول الرطوبة أو الأكسجين في حال حدوث تسريب كما هو مبين في الشكل [(22-1) (ب)]. ويتم إضافة جهاز للحماية من إرتفاع الضغط أو إنخفاضه داخل المحول يُسمى (Pressure vacuum bleeder) بحيث يكون نطاق الضغط لهذا النوع (-8psi – 10psi).

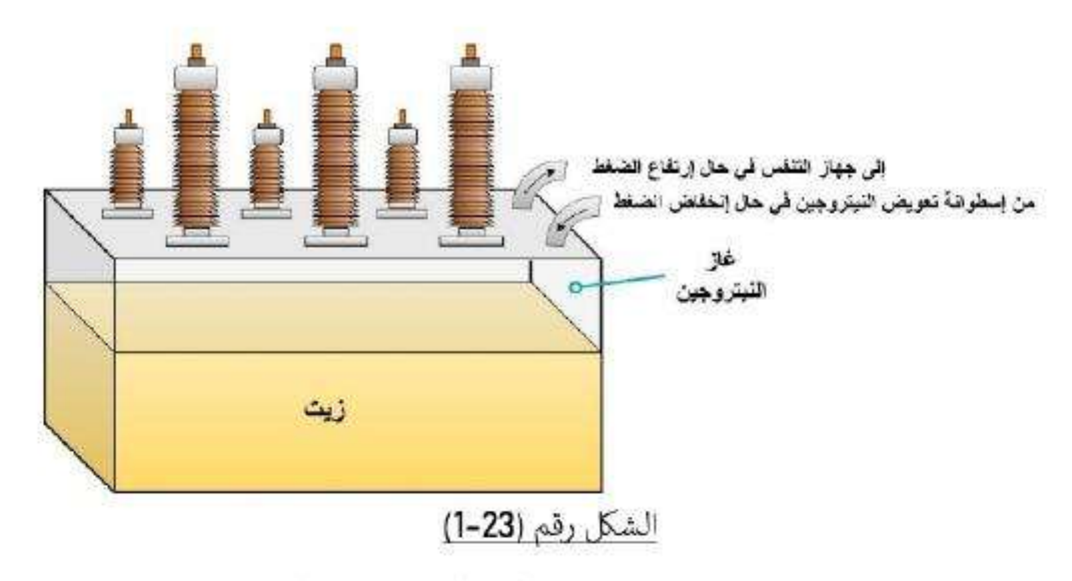


الشكل رقم (22-1)

- خزان ذو نظام تحكم بضغط الغاز الخامل - Inert-Gas-Pressure System Tank

لا يحتوي هذا النوع على خزان تعويض أو تمدد (Conservator tank)، بحيث يحتوي الخزان على زيت المحول بالإضافة إلى مساحة أعلى الزيت تكون مملوءة بغاز النيتروجين الخامل بضغط أعلى بمقدار بسيط من الضغط الجوي مما يَحول دون دخول الرطوبة أو الأكسجين في حال حدوث تسريب كما هو مبين بالشكل (23-1). ويتم إضافة جهاز لمراقبة الضغط داخل المحول وفي حال إنخفاضه عن قيمة معينة يقوم بزيادة الضغط عن طريق حقن غاز النيتروجين، وفي حال إرتفاع الضغط عن قيمة مُعينة يتم طرد كمية من غاز النيتروجين خارج المحول عبر جهاز التنفس (Breather)، بحيث يكون نطاق الضغط لهذا النوع (0.5psi – 7.5psi).

كما وتجدر الإشارة إلى أنه في حال إستبدال إسطوانة النيتروجين الخاصة بالمحول لا يتم التواصل ما أي مورد لهذا النوع من الغاز بشكل عشوائي، بل يجب التأكد من مواصفات هذا الغاز وذلك لأن النيتروجين المستخدم في المحولات يجب أن يُطابق المواصفات المنصوص عليها في المعايير [ASTM D-1933 Type III] وكما هو موضح في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE C57.12.00-1993].

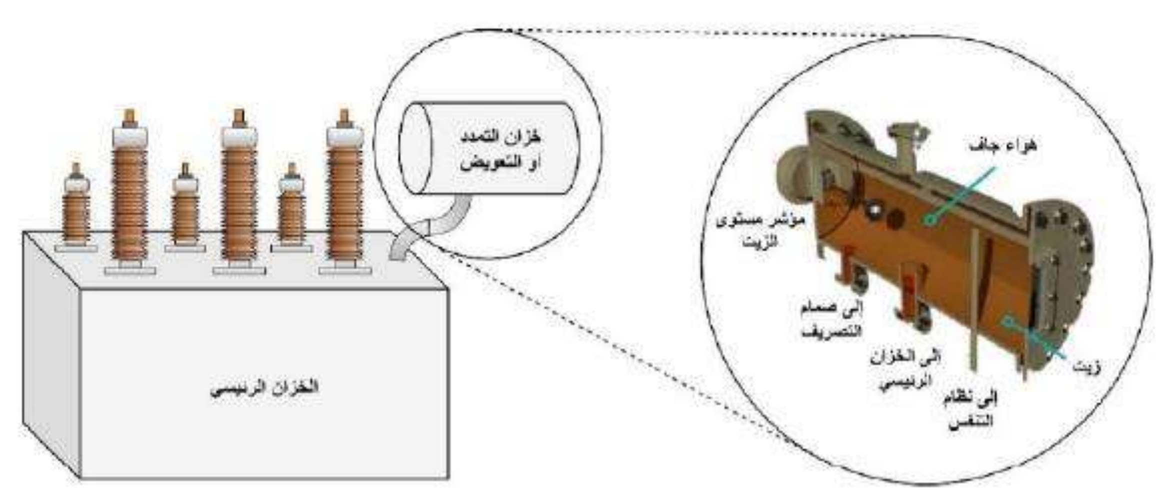


الشكل رقم (1-23)

- **نظام ذو خزان تعويض/تمدد مفتوح على الهواء الجوي المحيط - Open to Atmosphere Conservator Tank**

في هذا النظام يكون الخزان الرئيسي للمحول مليء كلياً بالزيت ويكون متصل بخزان تعويض أو تمدد (**Conservator tank**) يَحتوي على زيت المحول بالإضافة إلى حيّز مليء بالهواء الجاف كما هو موضح بالشكل (**1-24**).

عند الإرتفاع الطبيعي لحرارة الزيت نتيجة لزيادة حمل المحول أو إرتفاع درجة حرارة البيئة المحيطة فإن هذا الزيت سوف يزداد حجمه مما يُقلل من حجم الحيّز فوق الزيت في خزان التعويض أو التمدد (**Conservator**) مُؤدياً لطرد جزء من هذا الهواء الجاف إلى البيئة المحيطة بالمحول عبر نظام التنفس أو ما يُسمى بال(**Breather**)، وفي حال إنخفاض درجة حرارة الزيت نتيجة لتقليل حمل المحول أو إنخفاض درجة حرارة البيئة المحيطة فإن هذا الزيت سيتقلص حجمه مما يؤدي لزيادة حجم الحيّز فوق الزيت في خزان التعويض أو التمدد (**Conservator**) مُعطياً مساحة إضافية لدخول الهواء الجاف عبر نظام التنفس مروراً بوعاء صغير يَحوي زيت وذلك لتخليص الهواء الداخل من أية جسيمات كالغبار وغيرها من الجسيمات غير المرغوب بها ومن ثم يمر هذا الهواء من خلال وعاء يَحوي مادة السيليكا جل والتي تتلخص وظيفتها بتخليص الهواء الداخل لخزان التعويض من الرطوبة.



الشكل رقم (1-24)

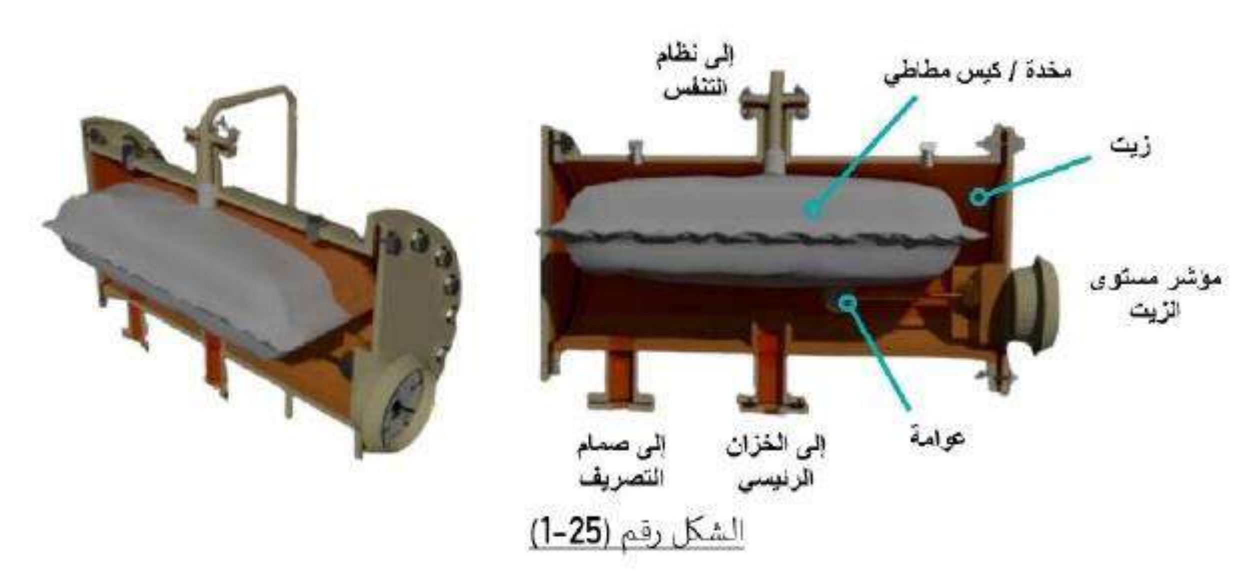
- **نظام بخزان تعويض ذو كيس هواء مطاطي – Conservator Tank with Air Cell**

في هذا النظام يكون الخزان الرئيسي للمحول مملوء كُلياً بالزيت ويكون مُتصل بخزان تعويض أو تمدد (**Conservator tank**) يحتوي على زيت المحول و مخدة - كيس مطاطي – أو كما تُسمى بالـ(**Air bag or cell**) مملوءة بغاز النيتروجين الخامل، ويّكون هذا الخزان معزول عن البيئة المحيطة حيث تمنع هذه المخدة حصول تماس مباشر بين الهواء الخارجي والزيت كما هو موضح بالشكل (**25-1**)، وعادةً ما يتم إستخدام هذا النوع من الخزانات في المحولات ذات الفولتية الأكبر من (**115kV**) كيلوفولت والسِعات الأكبر من (**10MVA**) ميجافولت أمبير.

عند الإرتفاع الطبيعي للضغط الداخلي للمحول والناتج عن إرتفاع درجة حرارة الزيت وإزدياد حجمه يقوم الزيت بالضغط على مخدة الغاز - الكيس المطاطي - مما يؤدي إلى خروج الغاز منها للبيئة المحيطة عبر نظام التنفس للمحول، و في حالة الإنخفاض الطبيعي للضغط الداخلي للمحول والناتج عادة عن إنخفاض درجة حرارة الزيت مما يؤدي لتقلص حجم الزيت مما يُعطي مساحة إضافية لمخدة الغاز ودخول الهواء الجاف عبر نظام التنفس مروراً بوعاء صغير يَحوي زيت وذلك لتخليص الهواء الداخل من أية جسيمات كالغبار وغيرها من الجسيمات غير المرغوب بها و من ثم يمر من خلال وعاء يَحوي مادة السيليكا جل والتي تتلخص وظيفتها بتخليص الهواء الداخل للمخدة من الرطوبة.



ملحوظة (6-1): تُصنَع المخدة (الكيس الهوائي) الخاصة بخزان التمدد من مادة المطاط وكما هو معلوم فإن المطاط من المواد التي قد تتسرب الرطوبة من خلالها، لذلك يجب تخليص الهواء الداخل لهذه المخدة المطاطية من الرطوبة عبر جهاز التنفس (**Breather**) كما ذُكر سابقاً.



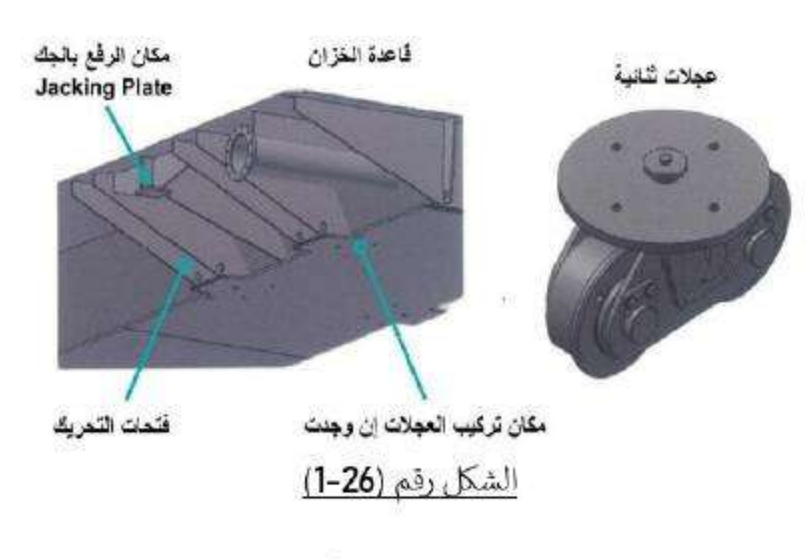
الشكل رقم (**25-1**)

وعلى ذِكر الخزان الرئيسي للمحول كان لزاماً أن نذكر الحَشيّة أو الحلقات المطاطية (**Gaskets**) التي تمنع تسرب زيت المحول في مناطق إلتقاء الأجزاء المعدنية الخاصة بالخزان كغطاء الخزان ونقاط توصيل

أنابيب الخزان الرئيسي بخزان التعويض ونقاط إلتقاء المُشع (**Radiator**) بالخزان الرئيسي وكذلك أغطية فتحات الخزان المختلفة وغيرها من الأماكن.

ويتم إختيار نوع الحَشيّة (**Gaskets**) آخذين بعين الإعتبار الحرارة التشغيلية للمحول ونوع الزيت أو المائع داخل المحول وكذلك الضغط الداخلي للمحول وذلك لتقوم هذه الحَشيّة (**Gasket**) بالعمل المُناط بها و هو منع تسرب الزيت لأطول فترة من الزمن مع مراعاة أن تكون المادة المكونة لها ليس لها أي تأثير على الزيت ولا تؤدي لتلوثه، كما ويجب تصميمها بشكل يُتيح سهولة إستبدالها عند تلفها.

كما و تُعد المواد التالية (**Cork-nitrile** أو **Cork-neoprene** أو **Nitrile** أو **Viton**) أكثر المواد المستخدمة شيوعاً في تصنيع هذه الحَشيّة (**Gasket**) حيث تمتلك كل مادة خصائص حرارية مختلفة عن الأخرى، فمنها ما يتم إستخدامه في الحرارات المُرتفعة أو المتوسطة ومنها ما يتم أستخدامه للحرارات المُنخفضة.

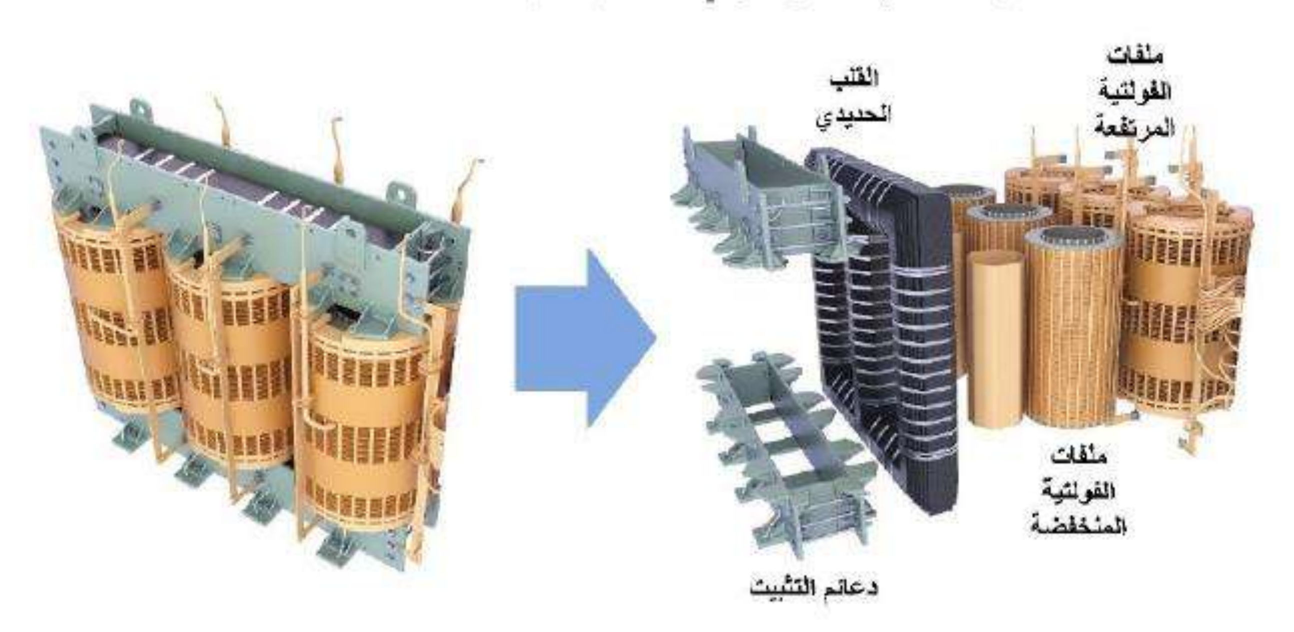


الشكل رقم (1-26)

وتجدر الإشارة أيضاً لبعض الملحقات الخاصة بالخزان الرئيسي للمحول مثل العجلات التي تُعتبر إضافة غير إجبارية بحيث يمكن تركيب المحول دون عجلات، بالإضافة إلى وجود فتحات بقاعدة الخزان الرئيسي يمكن تحريك المحول من خلالها في طور التركيب بالموقع (**Installation**) وتُسمى (**Haulage eyes**)، وكذلك يوجد منطقة يتم تصميمها لتتحمل قوة ميكانيكية كبيرة و تستخدم لوضع الجك عليها ورفع المحول وتُسمى (**Jacking point or plate**) كما يظهر بالشكل (**1-26**).

5.2 الجزء الفعال - Active part

يتكون هذا الجز من القلب الحديدي بالإضافة لملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة و كذلك دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي كما هو مبين في الشكل **(1-27)**.



الشكل رقم **(1-27)**

• القلب الحديدي - Iron Core

هو ذلك الجُزء الذي يحمل الملفات الإبتدائية والثانوية للمحول ويُعتبر أيضاً مسار الفيض المغناطيسي داخل المحول و المسؤول عن نقل الفيض المغناطيسي وتركيزه بين ملفات المحول لما له من نفاذية مغناطيسية مرتفعة (**High Permeability**).



الشكل رقم **(1-28)**

وعند تصميم القلب الحديدي للمحول وإلى جانب خصائصه الميكانيكية والحرارية تتم مراعاة أن تكون الضياعات الناتجة عن هذا القلب أقل ما يُمكن وذلك بإختيار المادة المناسبة المُكوِّنة لهذا القلب حيث يجب أن تكون مادة حديدية مغناطيسية **(Ferromagnetic material)** أي أن نفاذيتها المغناطيسية مرتفعة (**High Permeability**)، وكذلك يجب أن تكون مادة ناعمة المَغنطة (**Soft magnetic**

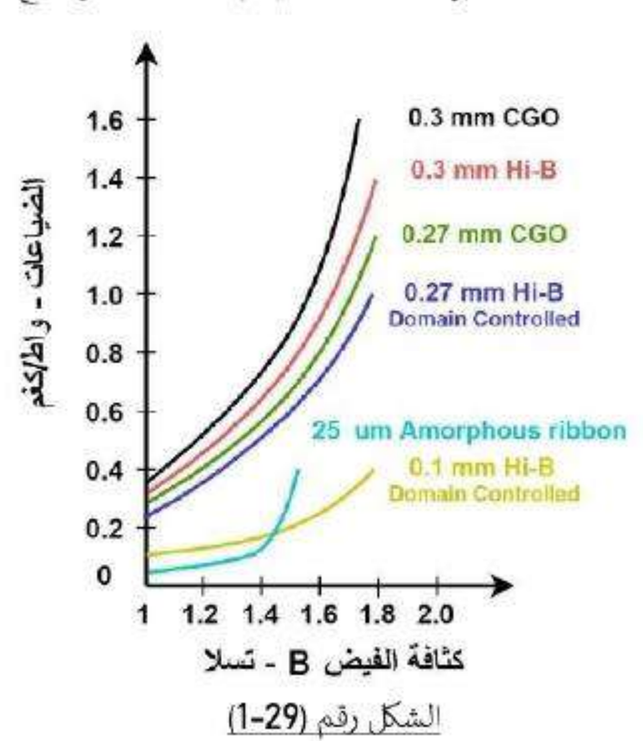
(**material**) أي عدم قدرتها على الإحتفاظ بمغناطيسية مُتبقية كبيرة بعد زوال تأثير المجال المغناطيسي الخارجي. وبالإضافة إلى إختيار المادة المناسبة للقلب الحديدي يتم جعل القلب يتكون من رقائق (**Laminations**) لا من قِطع سميكة مُصمتة من المعدن بحيث تكون هذه الرقائق (**Laminations**) متراصة فيما بينها ومعزولة عن بعضها البعض.

- **أنواع و فئات المعادن المُكوّنة للقلب الحديدي**

تُعتبر الإصدارات المُحسنة من الحديد السيلكوني موجه الحبيبات والمُدرفل على البارد (**Cold rolled grain-oriented silicon steel - CRGO**) و أحياناً يُسمى بالحديد الكهربائي (**Electrical steel**) عوضاً عن الحديد السيليكوني (**Silicon steel**) أكثر المواد المستخدمة شُيوعاً لما له خصائص مغناطيسية جيدة. ويُقصد بتوجيه الحبيبات (**Grain-oriented**) ترتيبها لتكون بإتجاه واحد وهو إتجاه الدَرفلة (**Rolling**)، حيث أن حبيبات هذا النوع من المعدن تُعطي أفضل خصائص مغناطيسية بالإتجاه التي تكون موجه إليه وتقلل من كمية الضياعات الهستيرية.

أما فيما يَخُص السيليكون فإن وجوده مع الحديد بنسبة معينة تتراوح من (**5% - 3%**) بالمئة يجعل الحديد أكثر مقاومة للتقادم (**Ageing**) ويُساعد في عملية توجيه حبيبات الحديد (**Grain orientation**) عن طريق جعل الحديد أقل قساوة ويُقلل أيضاً من الضياعات الهستيرية (**Hysteresis losses**) بالإضافة إلى زيادة المقاومه الكهربائية للحديد (**Resistivity**) مما يَحد من التيارات الدَوّامية (**Eddy currents**) وبالتالي يُقلل من قيمة الضياعات الناتجة عن هذه التيارات. إذ أن الحديد السيليكوني المُستخدم في المحولات والذي يَحوي ما نسبته (**3%**) بالمئة من السيليكون تَصل مقاومته الكهربائية لـ(**50** $\mu\Omega cm$) أي أنها إزدادت بمقدار أربعة أضعاف عن نظيرتها للحديد غير السيليكوني أو النقي (**Pure Iron**).

وبالمقابل فإن وجود السيليكون مع الحديد بنِسَب أكبر من النِسَب الموصى بها من شأنه جعل الحديد هَشّ وصعب التشكيل بالإضافة لتقليل نفاذيته المغناطيسية (**Permeability**)، إذ أن نقطة الإشباع (**Saturation point**) للحديد السيليكوني تساوي (**2.03 T**) تسلا عوضاً عن (**2.15 T**) تسلا للحديد غير السيليكوني أو النقي (**Pure Iron**) أي أنها قلّت قُرابة الـ(**6%**) بالمئة، علماً بأن كثافة الفيض للمحولات عادة ما تكون من (**1.3T – 1.8T**) تسلا بوضع التشغيل الطبيعي للمحولات.



الشكل رقم (1-29)

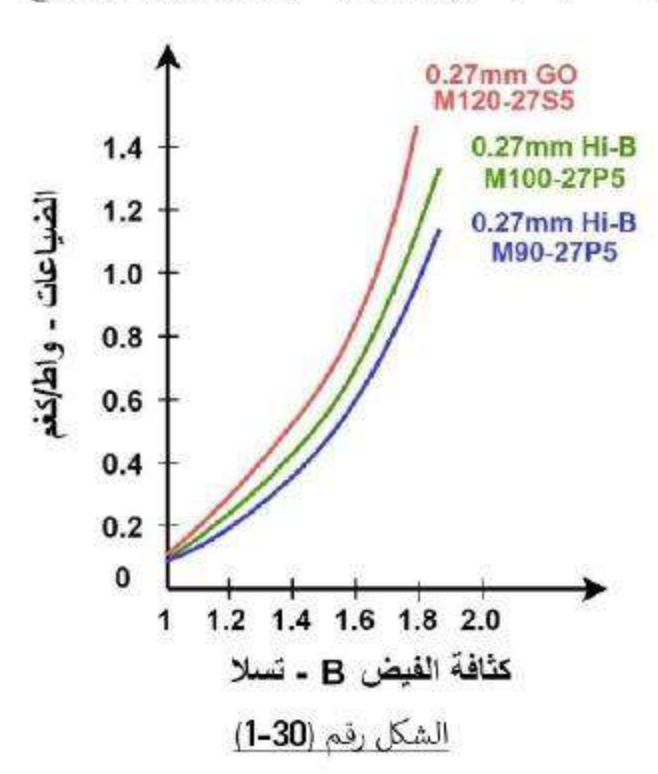
أحدثت تكنولوجيا إضافة السيليكون للحديد بالنِسب المُعينة المذكورة سابقاً ثورة في تصنيع المادة المُكوّنة للقلب الحديدي، حيث أن قيمة ضياعات القلب (**Core Losses**) لأول معدن حديد تم إضافة السيلكون له تساوي قرابة الـ(**7 W/kg**) واط/كغم فقط عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (**1.5 T**) تسلا وتردد

مقداره (**50 Hz**) هيرتز، وهذه التكنولوجيا كانت الأساس لما آتى بعدها من مواد مُكوّنة لهذا القلب إبتداءاً من الحديد غير موجه الحبيبات (**Non-Oriented**) مروراً بالحديد موجه الحبيبات والمُدرفل على الساخن (**Hot Rolled Grain-Oriented – HRGO**) ذو ضياعات قلب قرابة الـ(**2 W/kg**) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (**1.5 T**) تسلا وتردد مقداره (**50 Hz**) هيرتز، ومن ثم الحديد موجه الحبيبات والمُدرفل على البارد (**Cold Rolled Grain-Oriented – CRGO**) ذو ضياعات قلب قرابة الـ(**1.5 W/kg**) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (**1.5 T**) تسلا وتردد مقداره (**50 Hz**) هيرتز والذي تم إستخدامه بشكل تجاري في نهاية ثلاثينيات القرن العشرين (**1939**)، وصولاً إلى الحديد عالي النفاذية موجه الحبيبات والمُدرفل على البارد (**High Permeability Cold Rolled Grain-oriented – Hi-B**) والذي يَحوي ضياعات أقل قرابة الـ(**25%**) بالمئة من نظيره (**CRGO**) التقليدي حيث تتراوح ضياعات القلب الخاصة بهذا النوع قرابة الـ(**0.85 W/kg**) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي مقداره (**1.7 T**) تسلا وتردد مقداره (**50 Hz**) هيرتز والذي تم إستخدامه مطلع سبعينيات القرن العشرين (**1970's**) و أصبح هو الأساس في صناعة القلب الحديدي للمحولات في منتصف تسعينيات القرن العشرين (**1995**) إلى يومنا هذا، وصولاً إلى ما آتى بعد ذلك من معادن كالحديد دقيق التبلور أو الحبيبات (**Microcrystalline steel**) والمعادن غير المتبلورة (**Amorphous steel**) والتي من شأنها تحسين كفاءة المحولات وذلك بخفض الضياعات الناتجة عن هذا القلب كما هو مبين بالشكل (**1-10**) ولكن ما زال إنتشار هذا النوع على نطاق ضيّق لتكلفته التصنيعية المرتفعة مقارنة بما سبقه من أنواع.

و يبين الشكل (**1-29**) التفاوت في قِيَم ضياعات القلب للأنواع المختلفة من المواد المُكوّنة للقلب الحديدي.

أما فيما يَخُص تركيب القلب الحديدي فإنه يتكون كما ذُكر سابقاً من رقائق رفيعة (**Laminations**) يتراوح سُمكها (**0.23mm – 0.35mm**) ملم ويُمكن أن تكون أقل من ذلك في بعض الأحيان، وتكون معزولة عن بعضها البعض بمادة الورنيش العضوية أو غيرها من أنواع طلاء العزل وإلا فلا فائدة من جعل القلب يتكون من هذه الرقائق إن لم تكن معزولة عن بعضها. وهذا العزل بين الرقائق تتراوح قيمة مقاومته الكهربائية عدة أومات (**Ohms**) بما يكفي للحد من التيارات الدوّامية (**Eddy currents**) في هذه القلب الحديدي.

الشكل (**1-30**) يوضح الفرق في ضياعات القلب لثلاث فئات (**Grades**) مختلفة من الحديد موجه الحبيبات (**Grain-oriented**) ذو السماكة (**0.27 mm**) ملم عند (**50 Hz**) هيرتز.

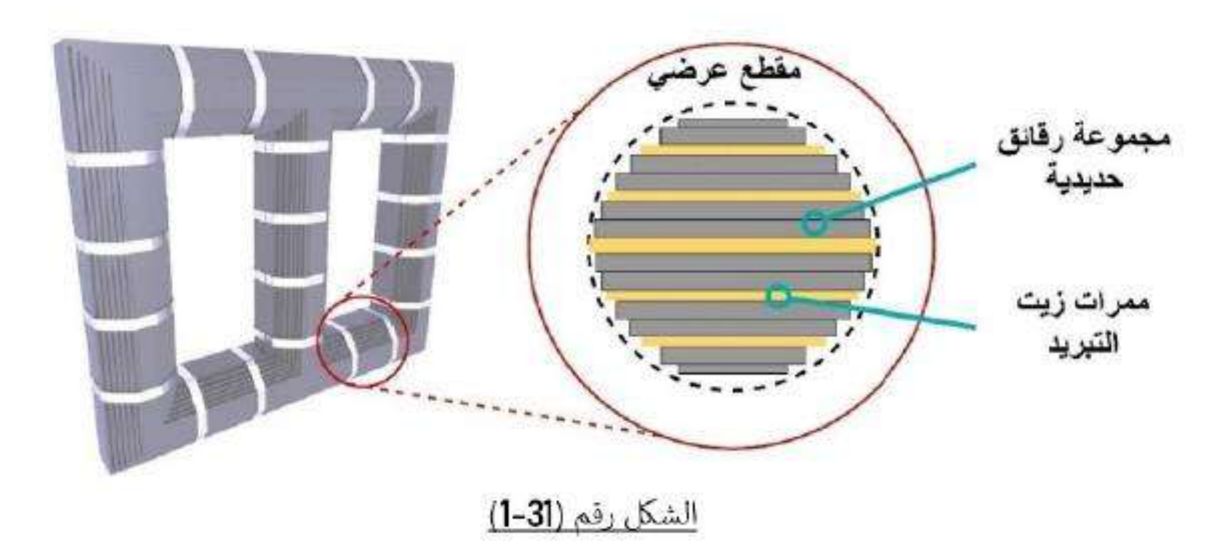


الشكل رقم (**1-30**)

إن الإختيار المناسب للمادة المُكوّنة للقلب وجعلها على شكل رقائق ما هو إلا لرفع كفاءة المحول وذلك بتقليل الضياعات الهستيرية وضياعات التيارات الدّوّامية مما يعني ضياعات قلب أقل، حيث تبلغ قيمة الضياعات النوعية القصوى (**Maximum specific losses**) للمحولات المُصنّعة حديثاً بين (**0.85 – 1.55 W/kg**) واط/كغم عند كثافة فيض مغناطيسي (**1.7 T**) تسلا و تردد (**50 Hz**) هيرتز.

- **أنواع القلب الحديدي من حيث التركيب:**

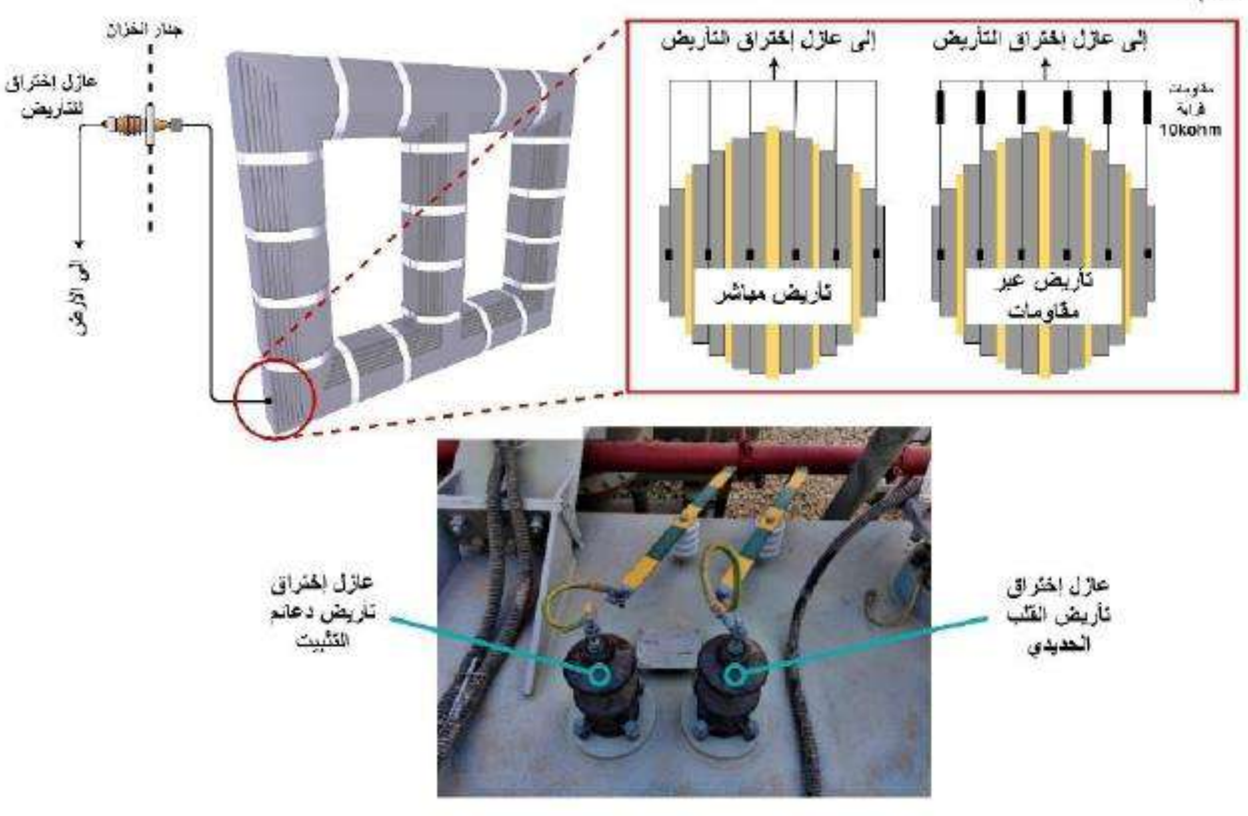
يتم تجميع الرقائق الحديدية (**Laminations Stacking**) المُكوّنة للقلب الحديدي وعزلها بطبقة من الورنيش (**Varnish**) أو غيرها من المواد العضوية وغير العضوية مثل الأغشية الزجاجية (**Glass film**) أو طبقات الفوسفات (**Phosphate layers**) التي يتراوح سُمكها من (**0.002mm – 0.003mm**) ملم حتى نحصل على الشكل النهائي للقلب الحديدي من حيث السُمك والأبعاد مع مراعاة ربط الرقائق المُكوّنة للقلب ببراغي (**Blots**) أو بأحزمة (**Bonds**) لغايات الدعم الميكانيكي كما يظهر في الشكل (**1-28**). حالياً تم التخلي عن طريقة ربط الرقائق ببراغي (**Bolts**) لما لها من تكلفة تصنيعية بالإضافة إلى زيادة الضياعات في القلب وما قد تسببه من مخاطر إنهيار العزل بين هذه الرقائق.



الشكل رقم (1-31)

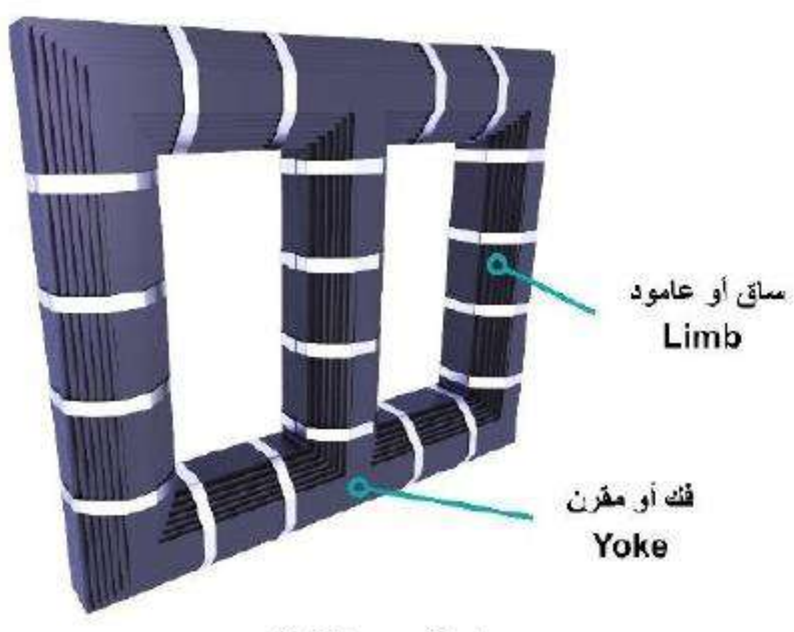
عند تجميع الرقائق الحديدية مع بعضها عادة ما يتم ترك فجوة بين مجموعات الصفائح لغايات تأمين ممرات لتبريد القلب بدخول الزيت من خلال هذه الفجوات أو الممرات كما هو مُبين بالشكل (**1-31**)، ولكن هذه الفجوات ينشأ عنها فولتيات نظراً لظهور مفاعلة سَعوية بين مجموعات الصفائح، وللتخلص من هذه الظاهرة غير المرغوب بها يتم تأريض القلب الحديدي للمحول من نقطة واحدة فقط بموصل نحاسي لتجنب حدوث تيارات دوّارة (**Circulating currents**) بالإضافة إلى تأمين ممر لتيارات العطل الخاصة بالقلب أو ما يُسمى بال(**Electrical fault path**) للرجوع لمصدرها منعاً لظهور الفولتيات المرتفعة المُصاحبة لتيارات العطل مما قد يؤذي المواد العزلة الخاصة بهذا القلب. وتتم عملية تأريض القلب بتمرير موصل التاريض الداخلي المُتصل بالقلب إلى خارج المحول عبر الخزان بواسطة عازل إختراق (**Core grounding bushing**) و من ثم وصلها بالأرض مباشرة، ويكون التأريض إما مباشرة أو عبر

مجموعة مقاومات أو كما تُسمى بالـ(**High resistive core grounding**) كما هو موضح في الشكل (**1-32**).



الشكل رقم (**1-32**)

ويتكون القلب الحديدي من جزئين رئيسيين الأول يُسمى الساق أو العامود (**Limb**) وهو الجزء العامودي من حُزمة الرقائق الحديدية و الجزء الثاني يُسمى الفك أو المِقرَن (**Yoke**) وهو عبارة عن الجزء الأفقي من حُزمة الرقائق الحديدية كما هو مبين بالشكل (**1-33**).

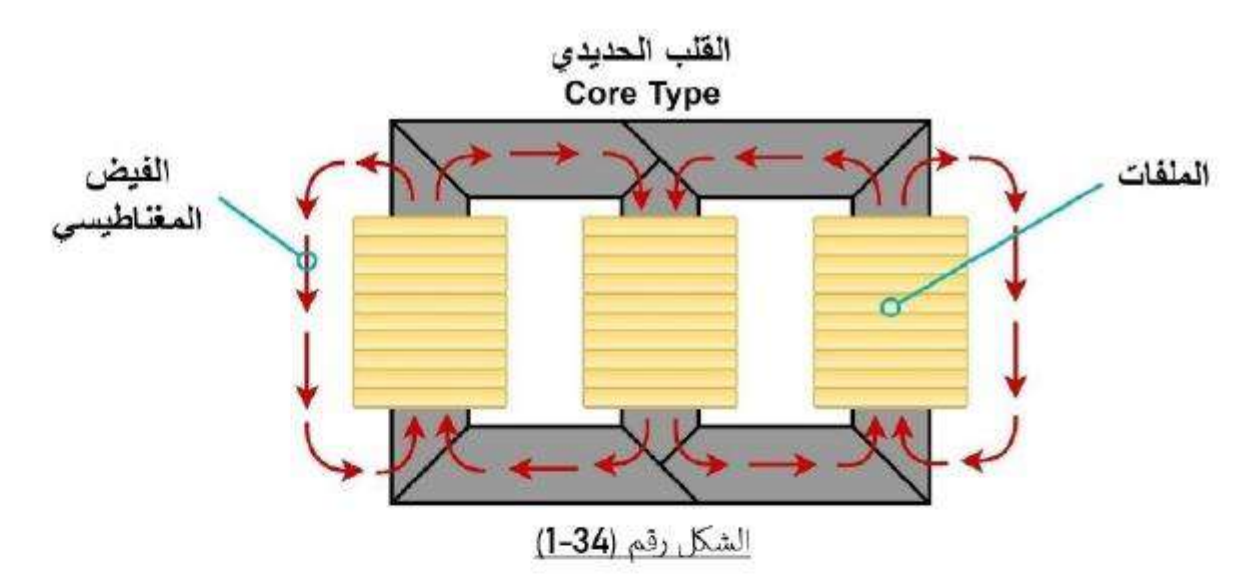


الشكل رقم (**1-33**)

وتنقسم أنواع القلب الحديدي من حيث عدد الأعمدة (**Limbs**) للمحولات ثلاثية الطور (**Three phase**) إلى نوعين رئيسيين وهم:

- ✓ القلب ثلاثي الأعمدة - **Three limbs core**

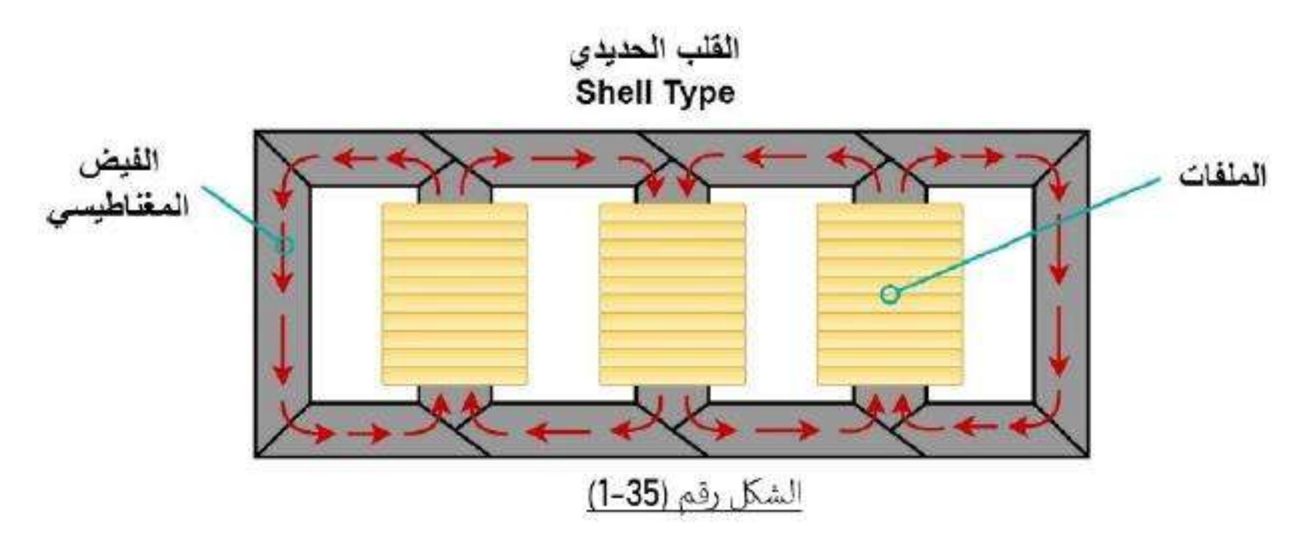
أيضاً يُسمى هذا النوع بالـ(**Core type**) و يُعد الأكثر شيوعاً للمحولات الصغيرة، ويكون العامود (**Limb**) والفك (**Yoke**) لهما نفس مساحة المقطع العرضي كما هو مبين في الشكل (**1-34**)، ويمتاز هذا النوع بالحجم الصغير مقارنة بالـ(**Shell type**) ومن سيئاته أنه ذو مقاومة ميكانيكية أقل من نظيره الـ(**Shell type**) خاصة في مواجهة القوى الميكانيكي الناتجة عن أعطل القِصَر أو موجات البرق العابرة.



الشكل رقم (**1-34**)

- ✓ القلب خماسي الأعمدة - **Five limbs core**

أيضاً يُسمى هذا النوع بالـ(**Shell type**) و يُعد الأكثر شيوعاً للمحولات الأكبر حجماً، ويكون الفك (**Yoke**) له مساحة مقطع أقل من العامود (**Limb**) لذلك من مميزات هذا النوع هو أنه ذو وزن قليل مقارنة بنظيره من نوع (**Core type**) وكذلك ذو قيمة ضياعات أقل ومقاومة ميكانيكية كبيرة ومن سيئاته السعر المرتفع نسبياً مما يجعله غير مُجدي إقتصادية للمحولات الصغيرة.



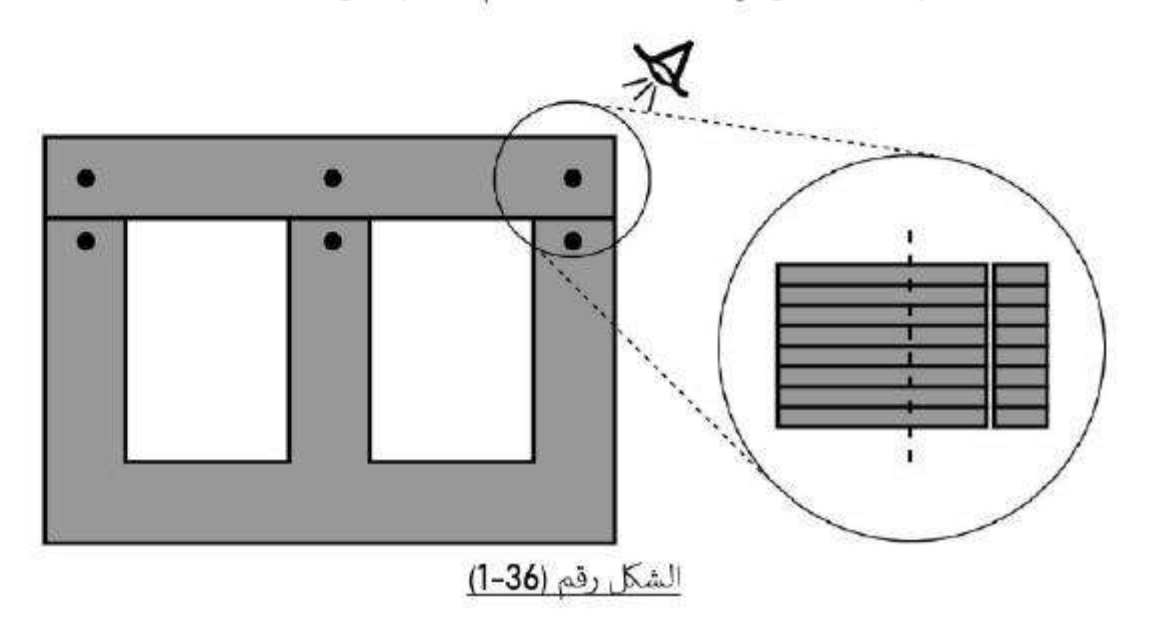
الشكل رقم (**1-35**)

كما و توجد أنواع أخرى مثل الـ(**4-Frame core design**) وغيره من الأنواع الخاصة التي عادةً ما يتم إستخدامها في المفاعلات الحثية (**Reactors**).

وعند تصنيع القلب الحديدي (**Laminations stacking**) للمحول فإنه يتم مراعاة منطقة إلتقاء العامود (**Limb**) بالفك (**Yoke**) وذلك لما لهذه المنطقة من أهمية قصوى، حيث يجب أن تكون ذات مُمانعة مغناطيسية قليلة (**Low Reluctance**) حتى لا تُعيق إنتقال الفيض المغناطيسي بالإضافة إلى تأمين قوى ميكانيكية كافية عند نقطة الإلتقاء أو ما يُسمى بالـ(**Mechanical security**).
والطُرق الأكثر شيوعاً لعمل الوصلة بين العامود (**Limb**) و الفك (**Yoke**) هي كالآتي:

✓ وصلة تناكُبية – **Butted Joint**

تُعد هذه الطريقة الأكثر بساطة والأقل كلفة تصنيعية وعادة ما يتم إستخدامها في المحولات الصغيرة، ويُعد الحديد غير موجه الحبيبات (**Non-Oriented Grain Steel**) الأكثر إستخداماً في هذه الطريقة من عمل الوصلات، إلا أن هذه الوصلة ذات قوة ميكانيكية متدنية بالإضافة إلى مُمانعة مغناطيسية مرتفعة نسبياً (**High Reluctance**) عند نقاط الإلتقاء – الوصلات - وذلك لضرورة مرور الفيض المغناطيسي من خلال الفجوة الهوائية ذات النفاذية المغناطيسية المتدنية (**Low Permeability**) في منطقة الوصلة الموضحة في الشكل (**1-36**)، مما يزيد من قيمة ضياعات القلب الناتجة عن زيادة تيار المغنطة اللازم للتغلب على هذه المُمانعة.

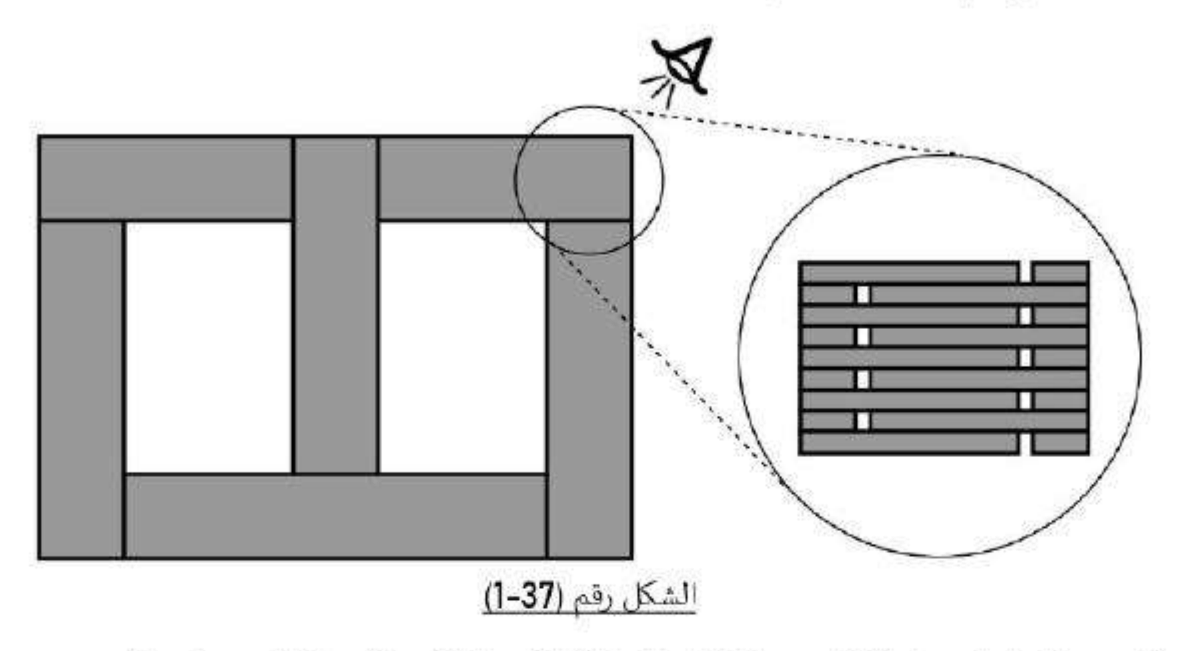


الشكل رقم (1-36)

✓ وصلة تناكبية متداخلة – **Interleaved Non-Step Butted Joint**

تُعد هذه الطريقة مثل الطريقة السابقة إلا أنه يتم عمل تداخل (**Interleaving**) بين الرقائق المُكّونة للقلب كما هو موضح في الشكل (**1-37**)، هذه الوصلة ذات مُمانعة المغناطيسية (**Reluctance**) عند نقاط الإلتقاء – الوصلات - عالية نسبياً ومُعيقة لسريان الفيض داخل القلب وذلك لقلة المسارات أمام الفيض المغناطيسي إما من خلال الفجوة الهوائية أو عبر الرقائق المُلاصقة بخيارات محدودة، بحيث يُمكن للفيض المرور بالرقاقة الملاصقة من أعلى أو أسفل الرقاقة الحاملة للفيض فقط، مما يزيد من قيمة ضياعات القلب الناتجة عن زيادة تيار المغنطة

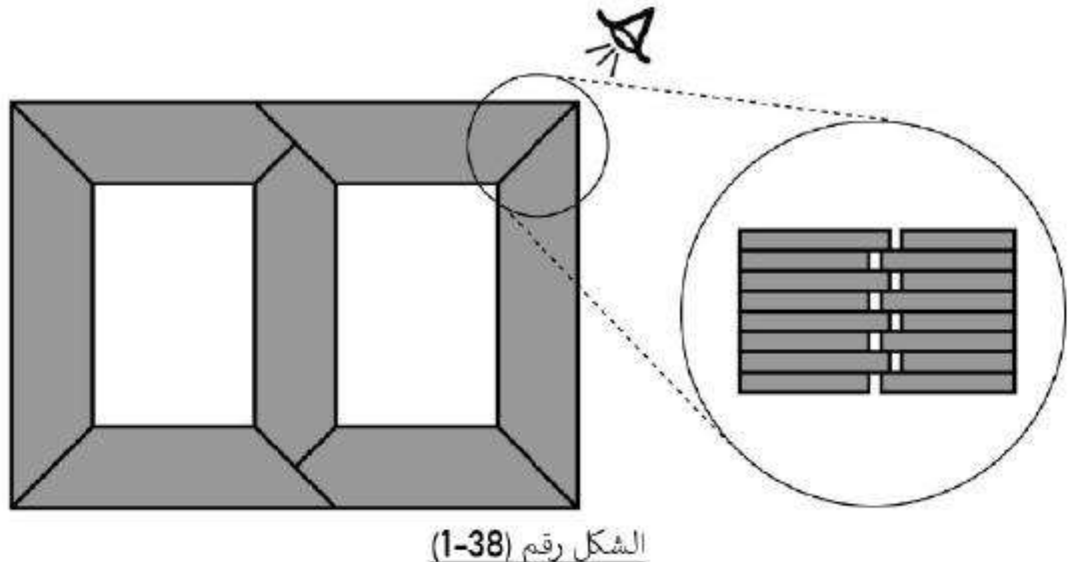
اللازم للتغلب على هذه الممانعة مقارنة مع طُرق الوصلات الزاوية الحديثة (ذات الزاوية **45°**) أو ما تُسمى بالـ(**Mitred Joints**).



الشكل رقم (**1-37**)

✓ **وصلة زاوية متداخلة ذات خطوة واحدة – Interleaved Non-Step Mitred Joint**

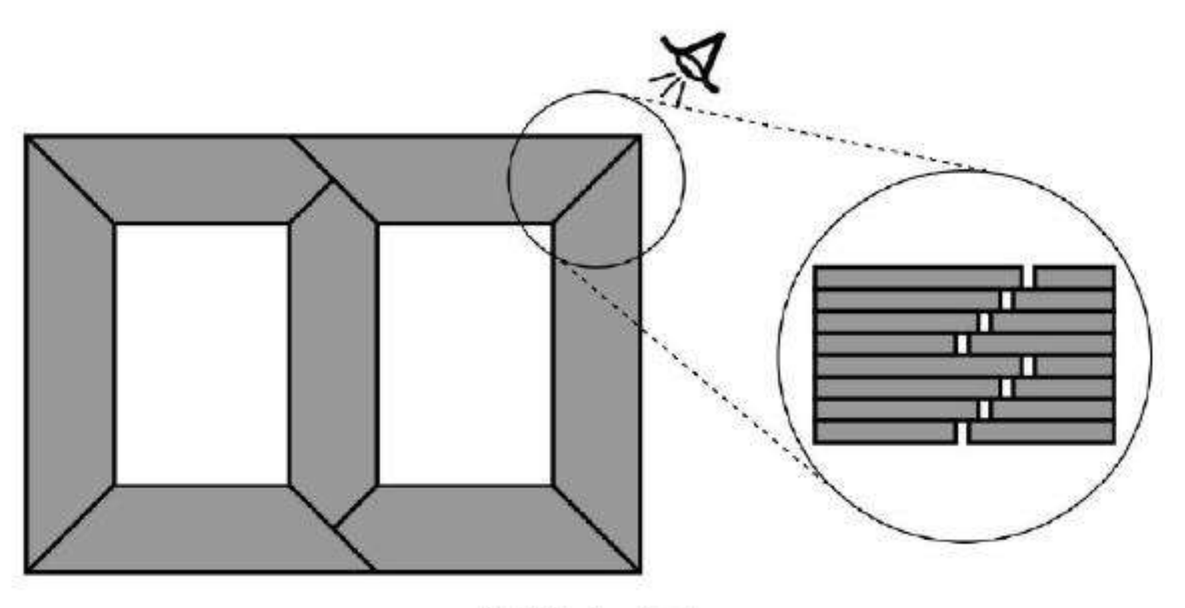
تُعد من الطُرق المنتشرة وذات مُمانعة مغناطيسية (**Reluctance**) أقل من سابقاتها عند نقاط الإلتقاء - الوصلات - مما يُقلل قيمة ضياعات القلب، ويُعد الحديد موجه الحبيبات (**Oriented grain steel**) الأكثر إستخداماً في هذه الطريقة من عمل الوصلات إلا أنها ذات كُلفة تصنيعية أعلى من الطُرق السابقة. الشكل (**1-38**) يوضح كيفية تجميع هذا النوع من القلب الحديدي.



الشكل رقم (**1-38**)

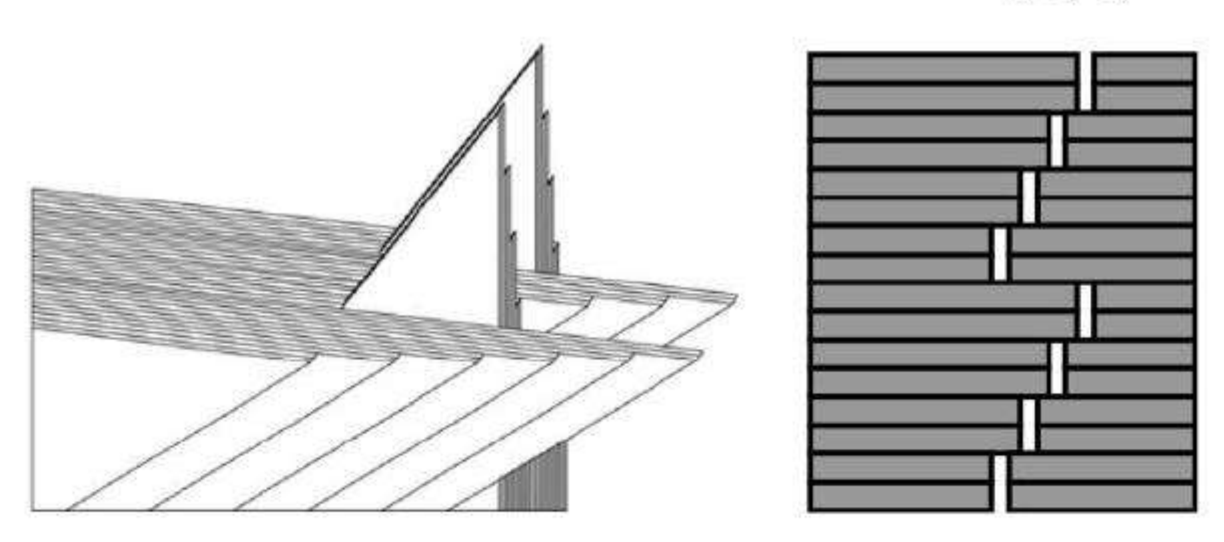
✓ **وصلة زاوية مُتعددة الخطوات - Step-lap Mitred Joint**

تُعد من الطرق الأكثر إنتشاراً بالمقارنة مع الطريقتين السابقتين، وتكون المُمانعة المغناطيسية (**Reluctance**) قليلة عند نقاط الإلتقاء - الوصلات - مما يُقلل من قيمة ضياعات القلب، إلا أنها ذات كُلفة تصنيعية عالية. الشكل (**1-39**) يوضح كيفية تجميع هذا النوع من القلب الحديدي.



الشكل رقم (**1-39**)

كما أن عدد الرقائق في الخطوة الواحدة يؤثر في مقدار ضياعات القلب، بحيث كلما قلّ عدد هذه الرقائق أدى لضياعات أقل كما هو الحال في الرقاقة الواحدة لكل خطوة ذات الضياعات الأقل بمقدار قرابة الـ(**7%**) بالمئة عنها للرقائق الأربعة لكل خطوة. لذلك عادة ما يكون التصميم ذو رقاقة واحدة لكل خطوة كما هو موضح في الشكل (**1-39**) أو خطوتين كما هو موضح في الشكل (**1-40**) أو أكثر من ذلك.



الشكل رقم (**1-40**)

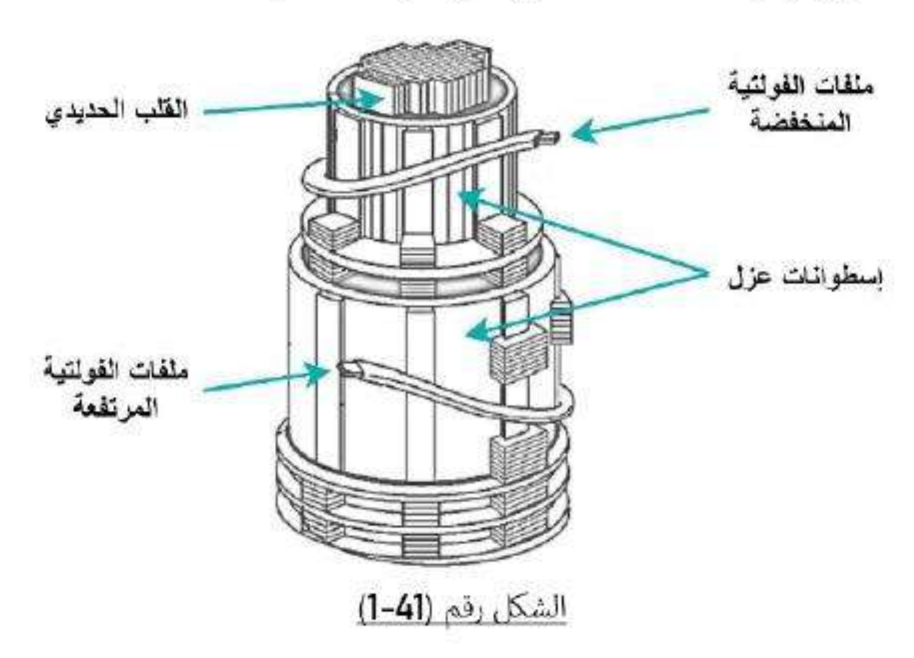
وعند تجميع الصفائح بأي من الطرق سابقة الذِكر يجب مراعاة أن تكون الفجوة الهوائية لمنطقة إلتقاء العامود (**Limb**) بالفك (**Yoke**) أقل ما يُمكن، حيث أن ترك فجوة مقدارها (**1.5mm**) ملم من شأنه زيادة الضياعات بمقدار (**1% - 2%**) بالمئة عن نظيرتها في حال عدم وجود فجوة. وهنالك أيضاً الكثير من طرق عمل الوصلات بين العامود (**Limb**) والفك (**Yoke**) ولكن الطرق سابقة الذِكر تُعد الأكثر إنتشاراً.



ملحوظة (7-1): وجب التنويه إلى أن أي كلمة حديد وردت في سياق الشرح قُصِدَ بها الحديد (**Iron**) أو الصُلب أو كما يُسمى الفولاذ (**Steel**) على حد سواء وذلك لتيسير الشرح، أما من الناحية العملية فإنهما يفترقان بالتركيب فالحديد عنصر، أما الصلب أو الفولاذ فهو سبيكة حيث أنها تتكون من حديد و كربون.

- **الملفات - Windings**

حسب اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) تم تعريف الملفات (**Winding**) على أنها مجموعة من اللفات (**Turns**) المرتبطة ببعضها، و تم تعريف اللفة (**Turn**) على أنها موصل (**Conductor**) أو مجموعة من الموصلات المُكوّنة على شكل حلقة (**Loop**). ومما سبق يُمكن معرفة أن الملفات الخاصة بالمحول ما هي إلى مجموعة من الموصلات والوظيفة الرئيسية المناطة بهذه الملفات هي حمل التيارات داخل المحول بالإضافة إلى تركيز المجال المغناطيسي الناتج عن هذه التيارات.



الشكل رقم (1-41)

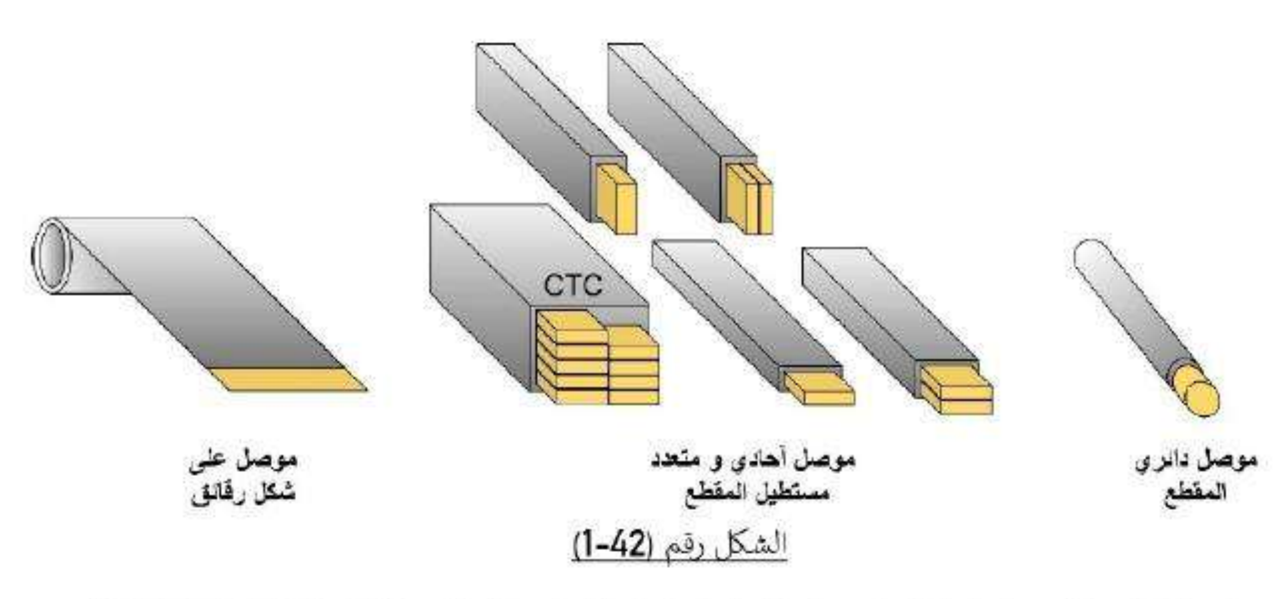
ويُعتبر النحاس من أكثر المواد المُستخدمة شيوعاً كموصلات داخل المحولات إلى جانب الألمنيوم في بعض الحالات، إذ يتم إختيار المُوصل النحاسي آخذين بعين الإعتبار سعة المحول وتياره وحدود الإرتفاع بالحرارة بالإضافة إلى القوى الميكانيكية التي يجب على الملفات تحملها أثناء التشغيل الطبيعي للمحول وأيضاً أثناء حدوث الأعطال.

وكما هو معلوم فإن هذا المُوصل النحاسي هو المسار الحامل للتيار داخل المحول، لذلك تم إختيار النحاس على وجه الخصوص لما له من مقاومة كهربائية منخفضة (**Low resistance**) تسمح بمرور التيار بأقل قدر من الخسائر الضائعة على شكل حرارة، بالإضافة إلى ما يمتلكه من خصائص ميكانيكية تساعده على مقاومة القوى الميكانيكية المؤثرة عليه أثناء دورة حياة المحول ضمن الظروف التشغيلية الطبيعية وغير الطبيعية كحدوث أعطال القِصَر (**Shor circuit faults**) وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية كبيرة تؤثر على الملفات. كما ويُفضّل إستخدام النحاس من نوع (**Cu-ETP**) كما تم تعريفه في الـ(**EN 13601**) أو ما يُعادله في الخصائص، حيث تصل موصلية هذا النوع من النحاس إلى قرابة الـ(**100%**) (**International Annealed Copper Strand – IACS%**) و تعادل مُقاومته قرابة الـ(**at** $0.01724\ \Omega.mm^2/m$

20°C)، كما ويتم مُعالجته لرفع قوة مقاومته للإجهاد الميكانيكي لتصبح اكثر من (220MPa) ميغا باسكال حيث تُعتبر مادة الـ(Silver-bearing copper - CuAg) إصداراً مُعدّلاً من النحاس المُستخدم في صناعة الملفات (Cu-ETP) سابق الذكر، حيث تُعطي مقاومة ميكانيكية أكبر للنحاس بالإضافة إلى زيادة الموصلية الحرارية والكهربائية كما وأنها مقاومة للتأكسد أيضاً.

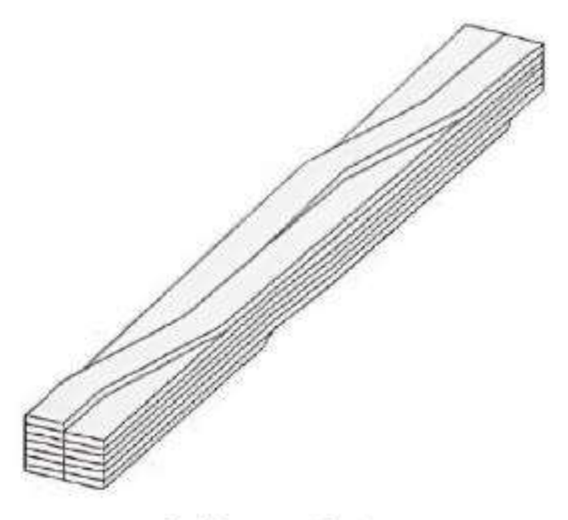
- **أنواع الموصلات المُكوّنة للملفات**

غالبية المحولات الكهربائية تتكون ملفاتها من موصلات ذات مَقطع مستطيل الشكل وذلك لتقليل حجم الملفات و الوصول إلى التوظيف المثالي للمساحة داخل المحول، وفي بعض التصاميم يتم إستخدام الموصلات ذات المقطع الدائري أو موصلات على شكل صفائح (Foils) كما هو الحال في المحولات الصغيرة والموضح في الشكل (1-42). وذهب مُصممو المحولات إلى جعل هذه الموصلات ذات مساحة مقطع صغيرة نوعاً ما، بحيث يتراوح سمكها من (1mm – 5.6mm) ملم و عرضها من (2.8mm – 16mm) ملم وذلك للتقليل من ضياعات التيارات الدَوّامية (Eddy currents) داخل هذه الموصلات نتيجة للفيض المغناطيسي المُتسرب مع مراعاة عدم جعل هذه الموصلات ذات مقطع صغير جداً مما يزيد من مقاومتها الكهربائية.



الشكل رقم (1-42)

مما سبق يَتضح أن مساحة مقطع الموصل الصغيرة مفيده للحد من التيارات الدَوّامية (Eddy currents) داخل هذه الموصلات وما ينتج عنها من ضياعات، ولكن بنفس الوقت كلما صَغُرَت مساحة مقطع الموصل زادت مقاومته الكهربائية مما دفع مُصمموا المحولات إلى جعل الملفات تتكون من مجموعة من الموصلات المتوازية لتحمل التيار الإسمي لهذا المحول والذي بدوره أدى لظهور تيارات دوّارة (Circulating currents) داخل هذه الموصلات المتوازية، و للتغلب على هذه التيارات الدوّارة تم عمل تبديل بين أماكن هذه الموصلات (Transposition) عند نهايات الملفات و ذلك للتقليل من الفرق في الفولتية المتولدة في هذه الموصلات نتيجة لتعرضها لمجال مغناطيسي مختلف خاصة في نهايات الملفات كما هو موضح في الشكل (1-43) حيث تُسمى هذه الطريقة بـ(Continuously Transposed Cable – CTC).



الشكل رقم (1-43)

الجدول الآتي يبين آلية إختيار نوع الموصل وفقاً لعدد لفات المحول ومقدار التيار المار في ملفاته.

الجدول رقم (1-1)

عدد اللفات	مستوى التيار		
	قليل	متوسط	كبير
قليل	رقائق / مستطيل	CTC	CTC
متوسط	موصل مستطيل	موصل مستطيل	موصل متعدد / CTC
كبير	موصل دائري	موصل مستطيل	موصل متعدد

كما ويُستخدم الورق ذو الطبيعة السليلوزية (**Cellulosic**) لغايات عزل هذه الموصلات (**Copper strands**)، بحيث يتم لف الموصل بعدة طبقات من الورق يتراوح سُمكها من (**0.05mm – 0.13mm**) ملم.

وعادة ما يتم إستخدام نوع واحد من الورق لعزل الموصلات أو يتم خلط أكثر من نوع و أيضا يمكن إستخدام ورق ذو مقاومة حرارية مرتفعة مثل (**Nomex**) في بعض الحالات.

ونظراً للفولتية ذات المقدار القليل بين الموصلات (**Voltage per turn**) يمكن عزل هذه الموصلات عن طريق طلائها بمادة الورنيش (**Enamel coating**) عوضاً عن الورق إذ يتراوح سمك هذا الطلاء قرابة (**0.1mm**) ملم ويمكن زيادة سُمكه إذا لزم الامر.

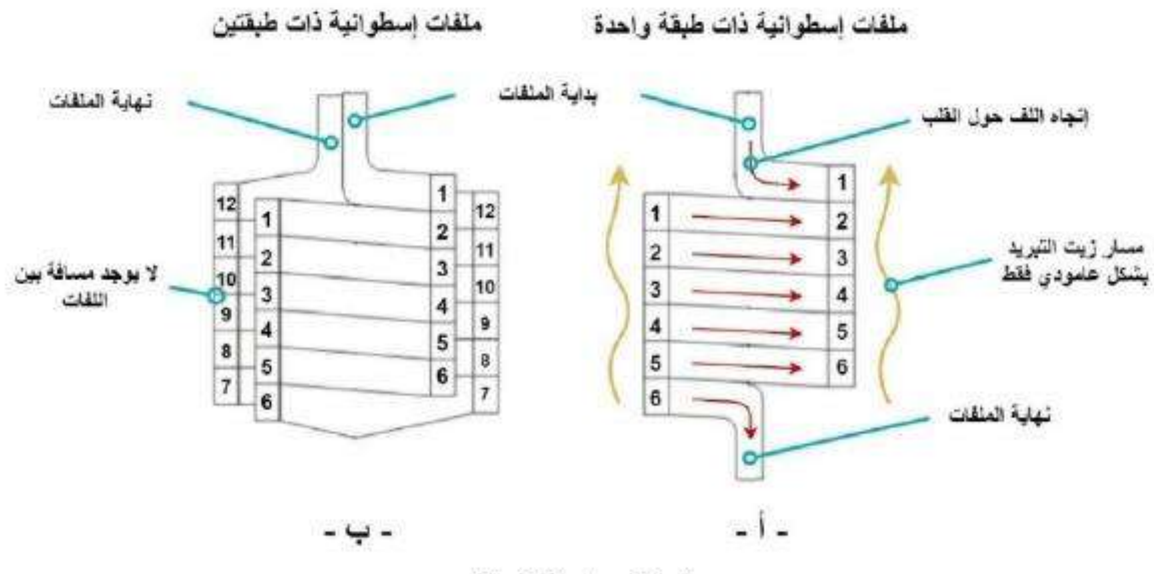
- **أنواع الملفات من حيث التركيب**

يتم تركيب الملفات حول العامود (**Limb**) للقلب الحديدي بحيث تكون ملفات الفولتية المنخفضة الأقرب للقلب الحديدي و ملفات الفولتية المرتفعة فوقها وذلك لضمان إنتقال أكبر ما يُمكن من الفيض المغناطيسي بين هذه الملفات بالإضافة إلى تقليل العزل اللازم لعزل ملفات الفولتية المرتفعة عن القلب

الحديدي للمحول كما هو موضح في الشكل (**1-41**). وهنالك عدة أنواع لطرق لف الملفات و تعد الأنواع الأربعة التالية الأكثر شيوعاً:

- **الملفات الطبقية أو الإسطوانية - Layer/Barrel winding**

يُعتبر هذا النوع من أبسط أنواع طُرق اللف بحيث يتم لف الموصلات فوق إسطوانة بشكل متلاصق ويتم ترك مساحة بين طبقات اللف (**Layers**) في حال كانت الملفات تتكون من أكثر من طبقة لتأمين ممر تبريد عامودي بين الطبقات كما هو موضح في الشكل (**1-44**)، وعادة ما يتم إستخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات التيار المنخفض وذلك لإنخفاض كفاءة التبريد العامودي فقط، حيث لا يوجد ممرات تبريد أفقية بين اللفات.

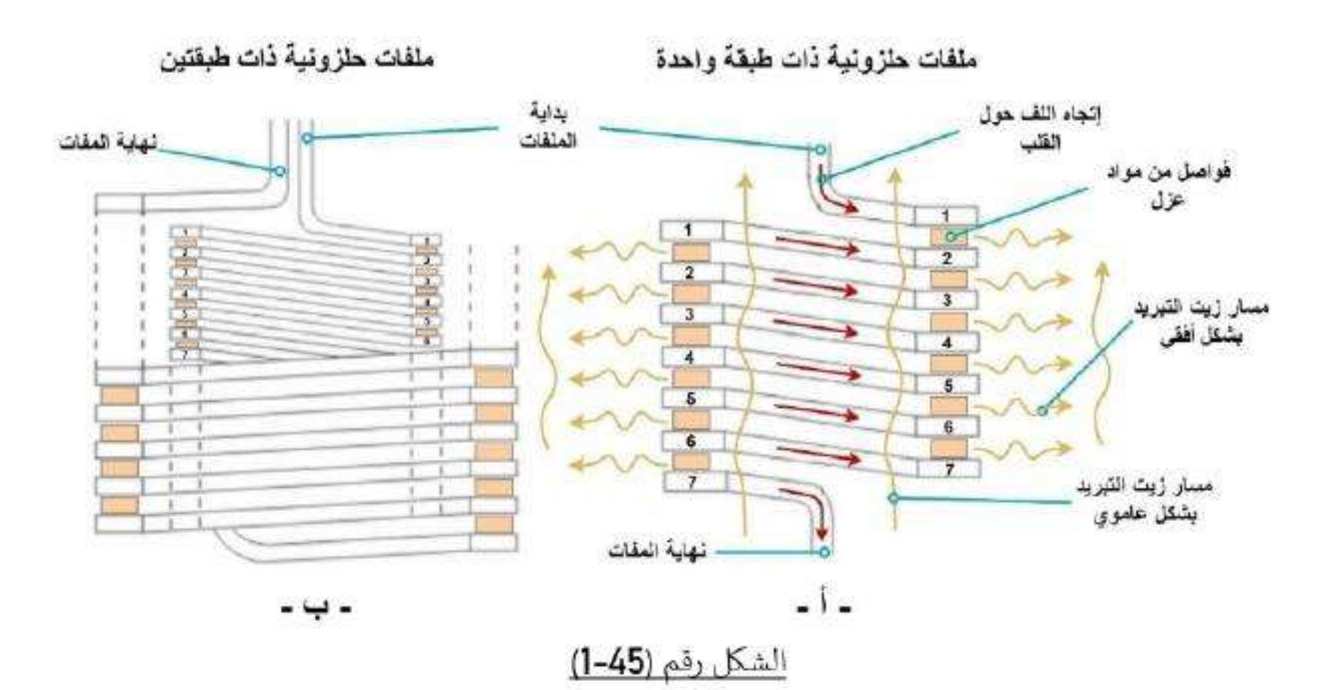


الشكل رقم (**1-44**)

- **الملفات الحلزونية - Helical winding**

يتم لف الموصلات بنفس الطريقة السابقة (**Layer winding**) مع مراعاة ترك مساحة بين اللفات بوضع عوازل من الألواح المضغوطة (**Pressboard**) على شكل فواصل (**Spacers**) ومساحة بين طبقات اللف (**Layers**) في حال كانت الملفات تتكون من أكثر من طبقة وذلك لتأمين ممر تبريد أفقي - بين الموصلات أو اللفات - وممر آخر عامودي - بين طبقات اللف - كما هو موضح في الشكل (**1-45**)، وعادة ما يتم إستخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات التيار المرتفع أو بمعنى آخر ذات الفولتيات المنخفضة.

كما وتَجدُر الإشار إلى أنه في هذا النوع من طُرق اللف عادة ما يتم إستخدام الموصلات من النوع (**CTC**) بشكل منفرد أو متعدد للحصول على مساحة مقطع الموصل المُرادة.



الشكل رقم (1-45)

- ملفات قُرصيّة - **Disc winding**

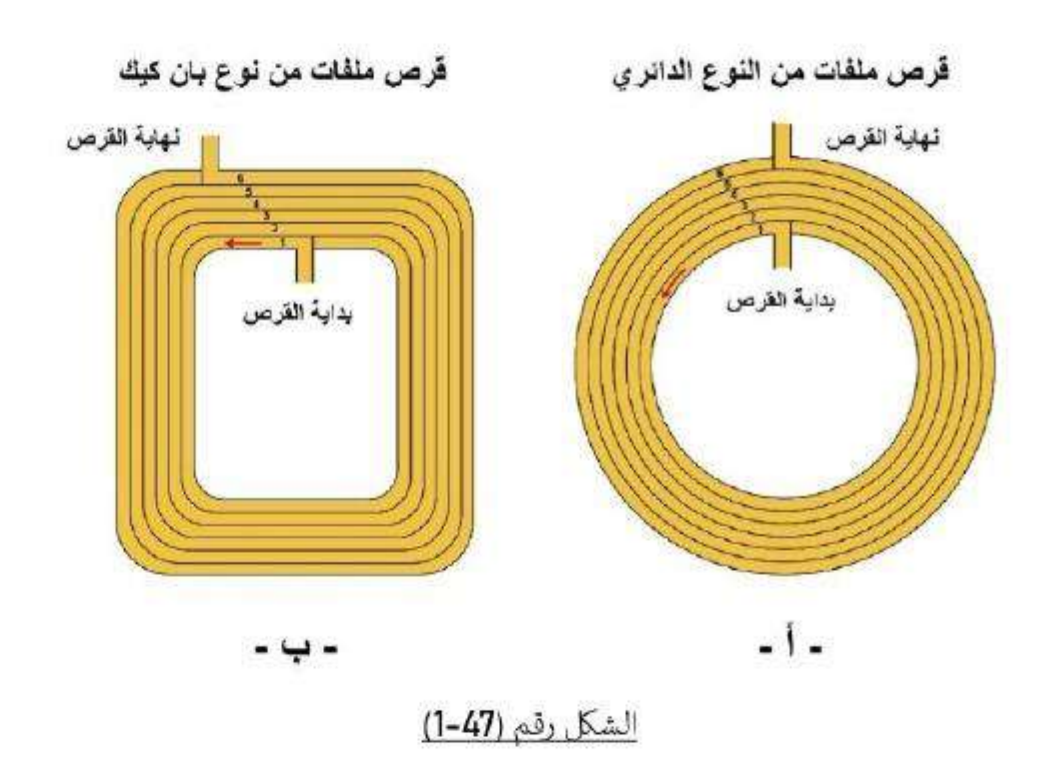
في هذه الطريقة يتم لف الموصلات على شكل أقراص دائرية بحيث يتكون القُرص الواحد من عدة لفات، وتتصل هذه الأقراص فيما بينها بوصلة أو ما يُسمى (**Disc to disc connection**) كما هو موضح في الشكل (**1-46**)، وعادة ما يتم إستخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات الفولتية التي تزيد عن (**25kV**) كيلوفولت.



الشكل رقم (1-46)

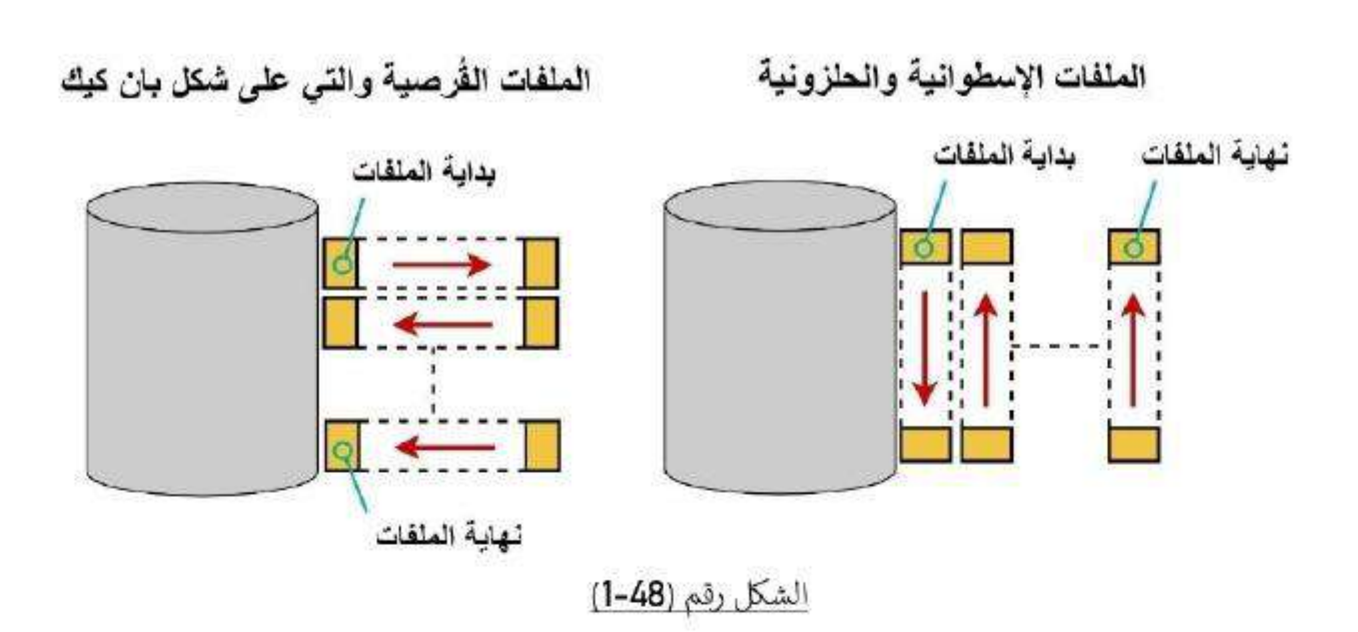
- ملفات على شكل بان كيك - **Ban-cake winding**

تُعد هذه الطريقة نوع من أنوع الملفات القُرصية ولكن الإختلاف أنه يتم لفها على شكل أقراص مستطيلة الشكل لا دائرية الشكل كما هو الحال في الملفات القُرصية سابقة الذكر، وكما هو موضح في الشكل (**1-47**)، وعادة ما يتم إستخدام هذه الطريقة باللف للمحولات ذات القلب الحديدي من نوع خماسي الأعمدة (**5 limbs core**) أو ما يُسمى بال(**Shell type core**).



الشكل رقم (**1-47**)

ومنه يُمكن مُلاحظة أن إتجاه اللف للطرق الأربعة سابقة الذِكر يَكون بالإتجاه الموضح بالشكل (**1-48**).



الشكل رقم (**1-48**)

- ## دعائم تثبيت القلب - Core Clamp

تكون هذه الدعائم المعدنية على شكل مشابك و ظيفتها الأساسية تطبيق قوى شد ثابتة على القلب الحديدي و الملفات وذلك لحماية هذه الأجزاء من القوى المؤثرة عليها أثنا عمل المحول في الظروف التشغيلية الطبيعية أو أثناء تعرُض المحول لأعطال القِصر (**Short circuit faults**) وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية تؤثر على الملفات والقلب الحديدي.



حيث تكون هذه الدعائم على شكل إطار (**Frame**) وتقوم بشد الفك (**Yoke**) العُلوي والسُفلي والملفات كما هو مبين في الشكل (**1-49**)، ويَكون هاذين الإطارين العُلوي والسُفلي مرتبطان ببعضهما بأعمدة وظيفتها تطبيق قوى شد على أعمدة المحول (**Limbs**). وكذلك هنالك وظيفة ثانوية لهذه الدعائم وهي توجيه الزيت داخل الملفات لزيادة كفاءة التبريد في حال إستخدام تصميم تدفق الزيت الموجه داخل الملفات (**Directed Oil Flow – DOF**) كما سيتم شرحه في نظام التبريد للمحول لاحقاً.

الشكل رقم (**1-49**)

كما وتجدُر الإشارة إلى ضرورة تأريض هذه الدعائم المعدنية من نقطة وحدة فقط بموصل نحاسي لتجنب حدوث تيارات دوّارة، وذلك بوصل هذه الدعائم بموصل وتمرير هذا الموصل إلى خارج المحول عبر الخزان بواسطة عازل إختراق (**Core Clamp Grounding Bushing**) و من ثم وصلها بالأرض مباشرة (**Solidly grounding**) كما هو موضح في الشكل (**1-32**).

5.3 مُغيّر الخطوة – Tap Changer

ويُسمى أيضاً بمُغيّر الفولتية ويُستخدم لتنظيم فولتية مَخرج المحول وذلك بالتحكم بعدد لفات ملفات المحول ذات الفولتية المرتفعة أو المنخفضة أو كلاهما إما بالزيادة أو النُقصان، بحيث يقوم بالمحافظة على مستوى فولتية مَخرج ثابتة في حال إختلافها نتيجة لتَغيُّر مِقدار فولتية المدخل أو نتيجة لمرور تيار الحمل وما ينتج عنه من ضياعات داخل المحول تؤدي لحدوث إنخفاض في مقدار فولتية المخرج مثل الضياعات النحاسية الناتجة عن مقاومة ملفات المحول أو الضياعات غير الفعالة الناتجة عن محاثة ملفات المحول (الفيض المُتسرب) و هذا الهبوط في الفولتية يُسمى بالـ(**Regulation**).كما وتَجدُر الإشارة إلى أن مقدار الهبوط في فولتية المخرج الناتج عن الضياعات النحاسية (**Resistive voltage drop**) أقل نوعاً ما من مقدار الهبوط في فولتية المخرج الناتج عن الضياعات غير الفعالة (**Reactive voltage drop**).

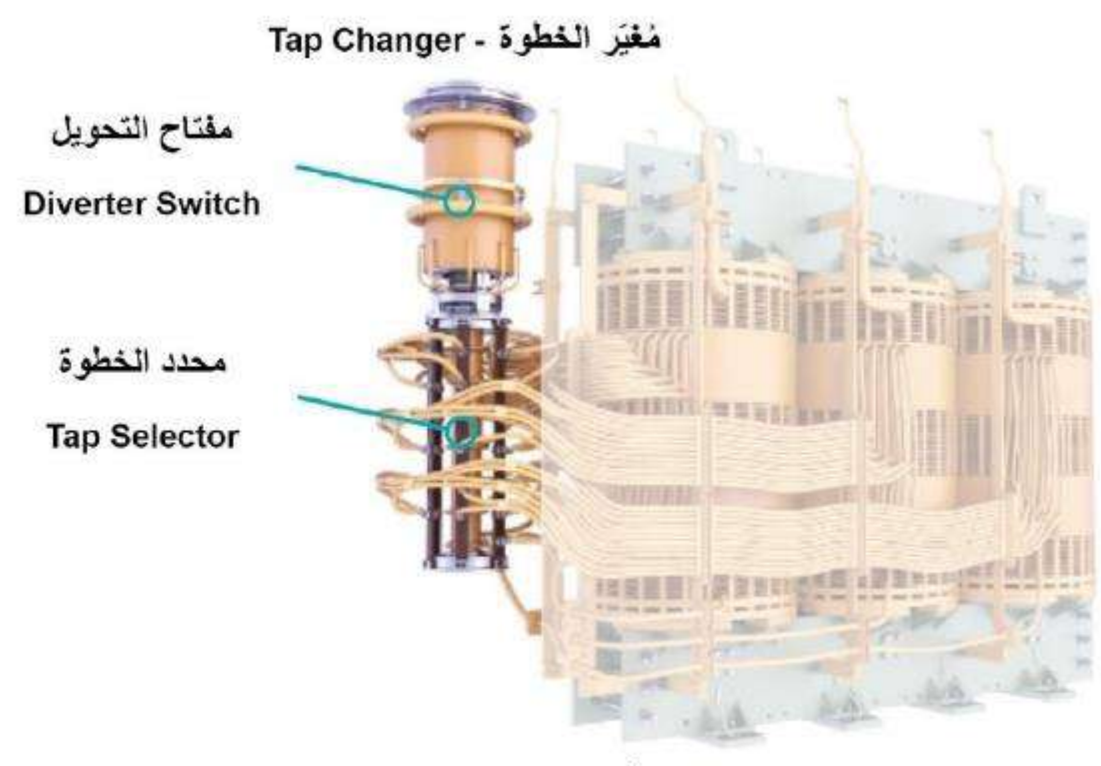


ملحوظة (8-1): يوجد وظيفة أخرى لمُغيّر الخطوة إلى جانب التحكم بالفولتية في حال تركيبه على محولات القُدرة الموصولة بالمولدات (**Generator Step-Up Transformer – GSUT**) ألا وهي التحكم بمقدار القدرة غير الفعالة (**Reactive power**) المُصدَّرة أو المُستجرة من الشبكة عبر هذا المحول.

أما فيما يَخُص مكان تركيب مُغيّر الخطوة فإنه بالعادة يتم تركيبه على ملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**) وذلك يعود لعدة أسباب أهمها:

- ✓ تيار ملفات الفولتية المرتفعة عادة ما يكون قليل مقارنة بتيار ملفات الفولتية المنخفضة مما يتيح وصل وفصل الملفات الإضافية بشكل أكثر آماناً و بقوس كهربائي أقل يُمكن إخماده بسهولة.
- ✓ ملفات الفولتية المرتفعة تكون مُثبّتة خارج ملفات الفولتية المنخفضة مما يُسهّل صيانة مُغيّر الخطوة في حال وجود عطل.
- ✓ عدد لفات ملفات الفولتية المرتفعة أكبر منها لملفات الفولتية المنخفضة مما يُعطي مساحة أكبر لتركيب مُغيّر الخطوة.
- ✓ عادة ما تكون ملفات الفولتية المرتفعة موصولة بطريقة النجمة (**Star – Y**) مما يُسهّل تركيب مُغيّر الخطوة وذلك لوجود نقطة التعادل (**Neutral point**).

ولا تعني الأسباب سابقة الذِكر عدم إمكانية تركيب مُغيّر الخطوة على ملفات الفولتية المنخفضة، بل يُمكن ذلك في بعض الحالات الخاصة.



الشكل رقم (50-1)

وقبل الخوض في مبدأ عمل مُغيّر الخطوة لا بُد من معرفة تصنيفاته وفقاً للأوجه التشغيله (**Operational aspects**)، حيث ينقسم إلى نوعين رئيسيين:

- ✓ (**On-load Tap-changer OLTC**)

يُمكن تغير وضعيّة هذا النوع من مُغيّرات الخطوة – الإنتقال من خطوة لأُخرى - أثناء عمل المحول أي وهو مُكهرب (**Energized**) ويُرمز له بالرمز (**OLTC**)، وفي هذا النوع عادة ما يكون فرق الفولتية بين الخطوات المتتالية أو ما يُسمى بفولتية الخطوة (**Step voltage**) ما مِقداره (**±0.8% - ±2.5%**) بالمئة من الفولتية الإسمية، كما ويكون عدد الخطوات (**Taps**) قُرابة الـ**17** خطوة أو أكثر من ذلك لمحولات القُدرة الكبيرة وتختلف من محول لآخر وفقاً لعدة معايير.

- ✓ (**Off-circuit** أو **De-energized Tap-changer OCTC or DETC**)

لا يُمكن تغير وضعية هذا النوع من مغيّرات الخطوة إلا في حالة كان المحول غير مُكهرب (**De-energized**) ويُرمز له برمزين أساسيين وهما (**DETC** أو **OCTC**)، وفي هذا النوع عادة ما يكون فرق الفولتية بين الخطوات المتتالية أو ما يُسمى بفولتية الخطوة (**Step voltage**) ما مِقداره (**±2.5% - ±5%**) بالمئة من الفولتية الإسمية، وفي هذا النوع عادة ما يكون عدد الخطوات (**Taps**) من (**3** إلى **5**) خطوات فقط.

• أنواع مُغيّرات الخطوة من نوع (On-load Tap-changers OLTC)

يُمكن تصنيف مُغيّرات الخطوة (**Tap-changers**) من النوع (**On-load**) وفقاً لعدة أوجه منها ما هو حسب آلية العمل ومنها ما هو تركيبي كالآتي:

○ حسب آلية العمل

تُصنف مُغيّرات الخطوة وفقاً لآلية العمل (**Principle of operation**) إلى ثلاث أصناف رئيسية:

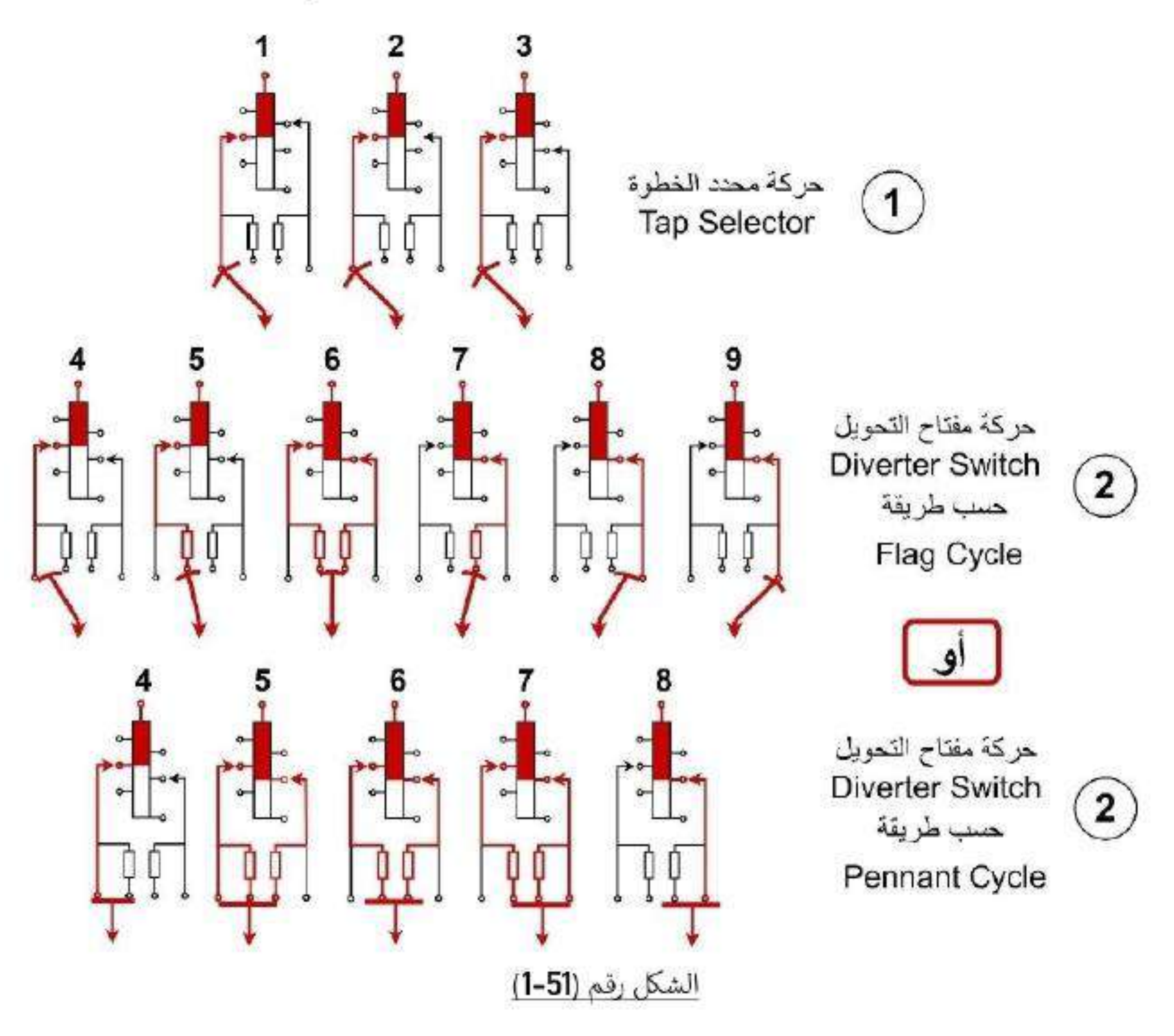
- **مُغيّرات خطوة (Tap-changers) ذات مُحدد خطوة (Tap selector) مُنفصل (Separated) عن مفتاح التحويل (Diverter switch) ويُسمى (Resistive Diverter Switch OLTC):**

يتم تحديد الخطوة المُراد التحويل عليها بإستخدام مُحدد خطوة (**Tap selector**) دون حمل (**Load free**) وبعد ذلك يتم تحويل مسار التيار بإستخدام مفتاح التحويل (**Diverter switch**) إما بطريقة الـ(**Flag**) أو بطريقة (**Pennant**) كما يَظهر في الشكل (**1-51**).

ويكون مفتاح التحويل (**Diverter switch**) في حُجرة زيت مختلفة عن خزان الزيت الرئيسي، أما فيما يَخُص مُحدد الخطوة (**Tap selector**) فإنه يكون مع مفتاح التحويل بنفس حُجرة الزيت أو مع الملفات في الخزان الرئيسي للمحول، ويَعود السبب وراء جعل مفتاح التحويل (**Diverter**

(switch) في حُجرة منفصلة لتجنب تلوث زيت الخزان الرئيسي للمحول بالكربون وغيره من الغازات الناتجة عن حركة هذا المفتاح وما ينتج عنها من شرارة قوس كهربائي ونقاط إحماء.

وفي هذا النوع من مُغيّرات الخطوة يقوم محرك كهربائي بتحريك مُحدد الخطوة (**Tap selector**) وكذلك يقوم بشحن الزنبرك (**Spring-loaded mechanism**) المسؤول عن تحريك مفتاح التحويل (**Diverter switch**) بزمن حركة يُقدر من (**40ms – 60ms**) ملي ثانية.

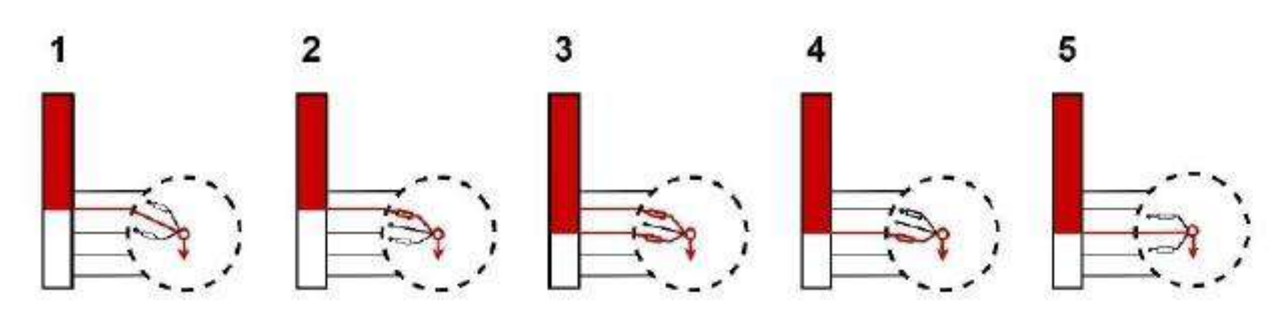


الشكل رقم (1-51)

- **مُغيّرات الخطوة (Tap-changers) ذات مُحدد خطوة (Tap selector) مُدمج (Combined) مع مفتاح التحويل (Diverter switch) ويُسمى (Resistive Selector Switch OLTC):**

حيث يتم تحديد الخطوة و التحويل عليها بنفس الوقت كما هو موضح بالشكل (**1-52**)، كما ويكون مُحدد الخطوة (**Tap selector**) مع مفتاح التحويل (**Diverter switch**) في نفس حُجرة الزيت والتي تكون مُنفصلة عن زيت الخزان الرئيسي للمحول. و يمتاز هذا النوع بالسعر الأقل نسبياً مقارنة بالنوع سابق الذكر (**Diverter switch OLTC**)، ويتم إستخدامه عادة بالمحولات متوسطة القدرة.

وفي هذا النوع من مُغيّرات الخطوة يتم التحويل بخطوة واحدة (**One Step**) بإستخدام محرك كهربائي لشحن الزنبرك (**Spring-loaded mechanism**) المسؤول عن عملية التبديل بزمن حركة يُقدر (**40ms – 180ms**) ملي ثانية.



الشكل رقم (1-52)

- **مُغيّرات الخطوة (Tap-changers) ذات مفتاح تبديل رئيسي (Change-over switch):**

يتم إستخدام مفتاح التبديل الرئيسي في حال كان مُغيّر الخطوة من نوع التبديل العكسي (**Reversing changeover OLTC**) أو من نوع التبديل ذو الخطوات الكبيرة والصغيرة (**Course/Fine tapping OLTC**) وسيتم التطرق لتركيب هاذين النوعين لاحقاً.



ملحوظة (1-9): تجدر الإشار إلى وجود نوع آخر من مُغيّرات الخطوة (**Tap-changers**) واسعة الإنتشار في أمريكا الشمالية والتي تعتمد على محاثات (**Reactors**) عِوضاً عن المقاومات (**Resistors**)، وعادة ما يتم إستخدامه في حال كان مُغيّر الخطوة مُثبت على ملفات الفولتية المنخفضة (**LV winding**) لما لهذا النوع من قدرة على تحمل التيارات المرتفعة.



ملحوظة (1-10): في بداية تسعينيات القرن العشرين (**1990's**) تم إستخدام مُغيّرات الخطوة (**Tap-changers**) ذات حُجرة تحويل مُفرغة من الهواء (**Vacuum type**) لما لهذا النوع من مميزات أبرزها الحجم الصغير نسبياً بالإضافة إلى تلوث زيت أقل مما يعني فترات صيانة أكبر قد تصل إلى عشرات السنوات.

- **حسب التركيب**

تُصنف مُغيّرات الخطوة وفقاً للأوجه التركيبية (**Arrangement aspects**) إلى ثلاث أصناف رئيسية:

- **مُغيّر خطوة خطي – Linear tap changer**

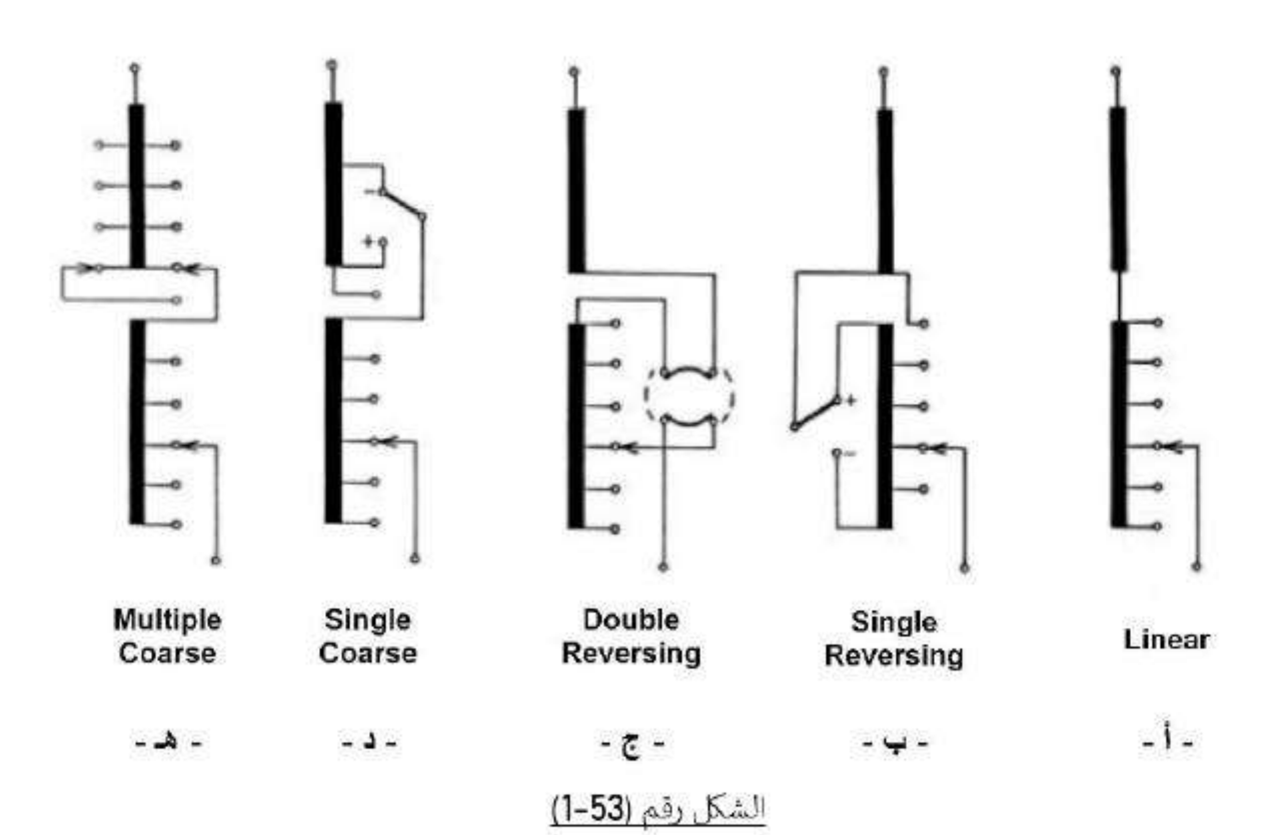
ويُعد أبسط أنواع مُغيّرات الخطوة وأكثرها إنتشاراً كما هو موضح في الشكل [(**1-53**) (أ)]، وعادةً ما يتم إستخدامه لنسبة تحويل فولتية أقل من (**20%**) بالمئة من الفولتية الإسمية.

- مُغيّر خطوة ذو تبديل عكسي - Reversing changeover OLTC

وينقسم إلى نوعين و هما (Single Reversing OLTC) و (Double Reversing OLTC) كما هو موضح في الأشكال [(1-53) (ب و ج)].

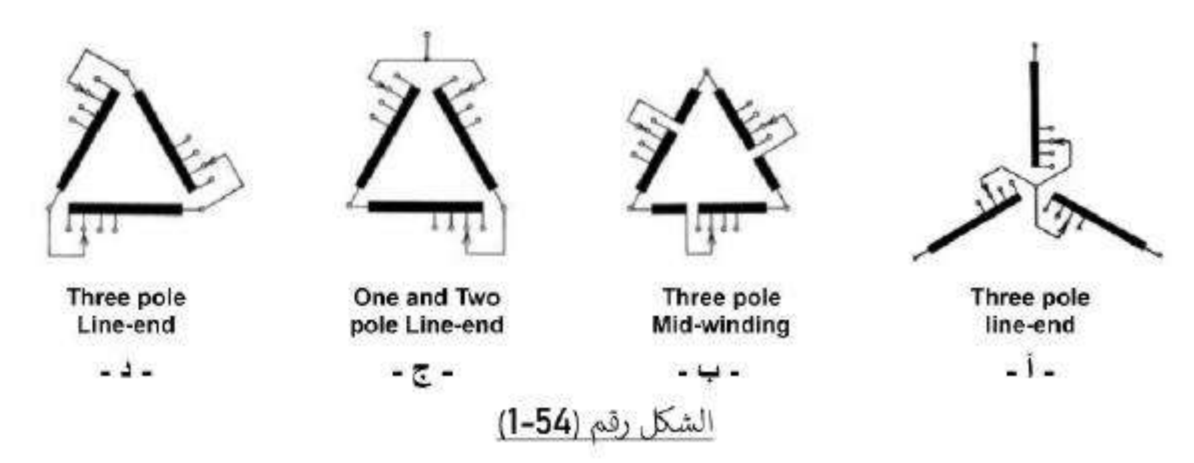
- مُغيّر خطوة ذو خطوات كبير وصغيرة - Coarse/fine tapping OLTC

وينقسم إلى نوعين وهما (Single Coarse/Fine Tapping) و (Multiple Coarse/Fine Tapping) كما هو موضح في الأشكال [(1-53) (د و هـ)].



الشكل رقم (1-53)

أما فيما يَخُص المحولات ثلاثية الأطور فإن تركيب مُغيّر الخطوة يكون وفقاً للشكل الآتي:



الشكل رقم (1-54)

و الجدول (1-2) يُوضح جُزء من لوحة البيانات (Name Plate) -جدول نسبة التحويل- لمحول ذو مُغيّر خطوة من نوع (OLTC) لمحول ثلاثي الطور ثنائي الملفات نسبة تحوليه (420kV/20kV) كيلو فولت،

والجدول (3-1) لمحول آخر ذو مُغيّر خطوة من نوع (DETC أو OCTC) ثلاثي الطور ثلاثي الملفات نسبة تحويله (20kV/11.5kV/11.5kV) كيلو فولت مبيناً نسبة التحويل ومقدار الإختلاف في الفولتية.

الجدول رقم (2-1)

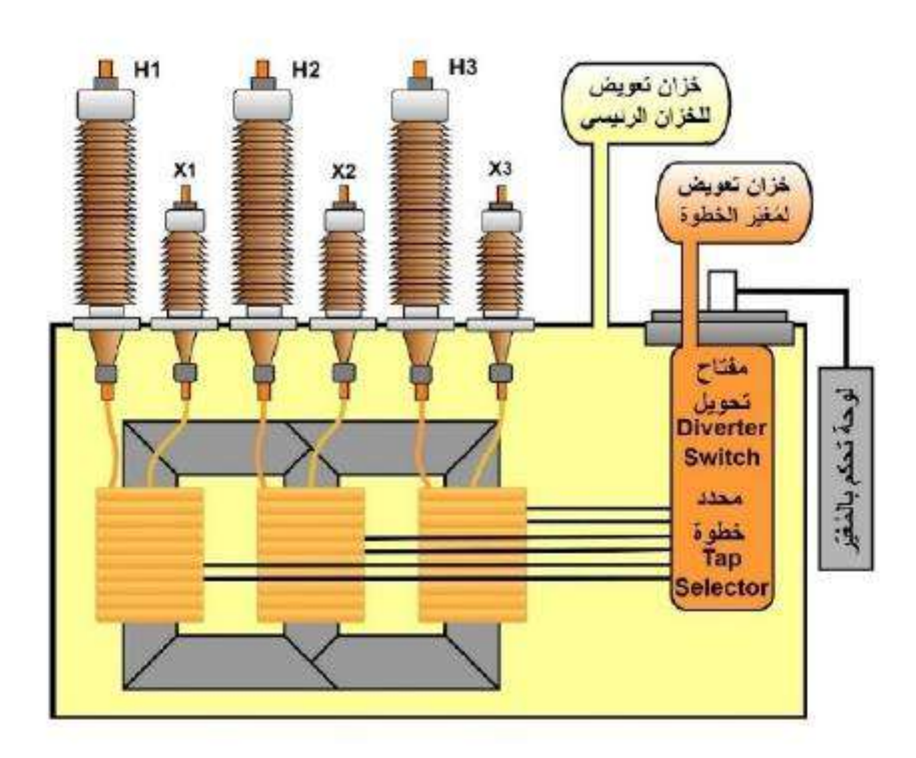
HV				LV	
Position	Tapping	Voltage V	Current A	Voltage V	Current A
1	10%	462000			
2	8.75%	456750			
3	7.5%	451500			
4	6.25%	446250			
5	5%	441000			
6	3.75%	435750			
7	2.5%	430500			
8	1.25%	425250			
9	0%	420000		20000	
10	-1.25%	414750			
11	-2.5%	409500			
12	-3.75%	404250			
13	-5%	399000			
14	-6.25%	393750			
15	-7.5%	388500			
16	-8.75%	383250			
17	-10%	378000			

الجدول رقم (3-1)

HV				LV1		LV2	
Position	Tapping	Voltage	Current	Voltage	Current	Voltage	Current
1	5%	21000					
2	2.5%	20500					
3	0%	20000		11500		11500	
4	-2.5%	19500					
5	-5%	19000					

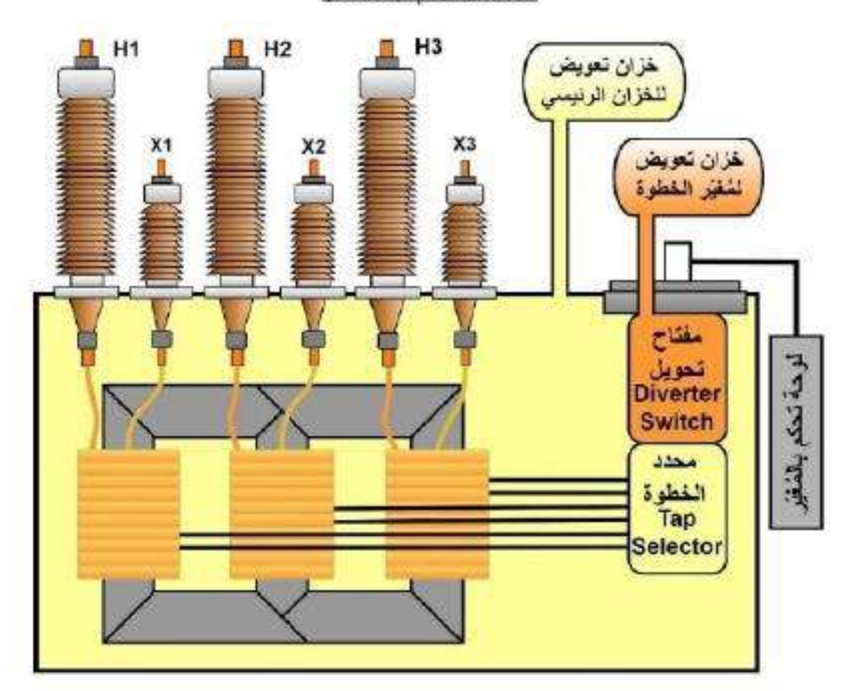
• طرق تركيب حجرة الزيت الخاصة بمُغيّر الخطوة مع الخزان الرئيسي

يتم تركيب حجرات الزيت الخاصة بمُغيّر الخطوة مع الخزان الرئيسي للمحول وفقاً للطُرق التالية:



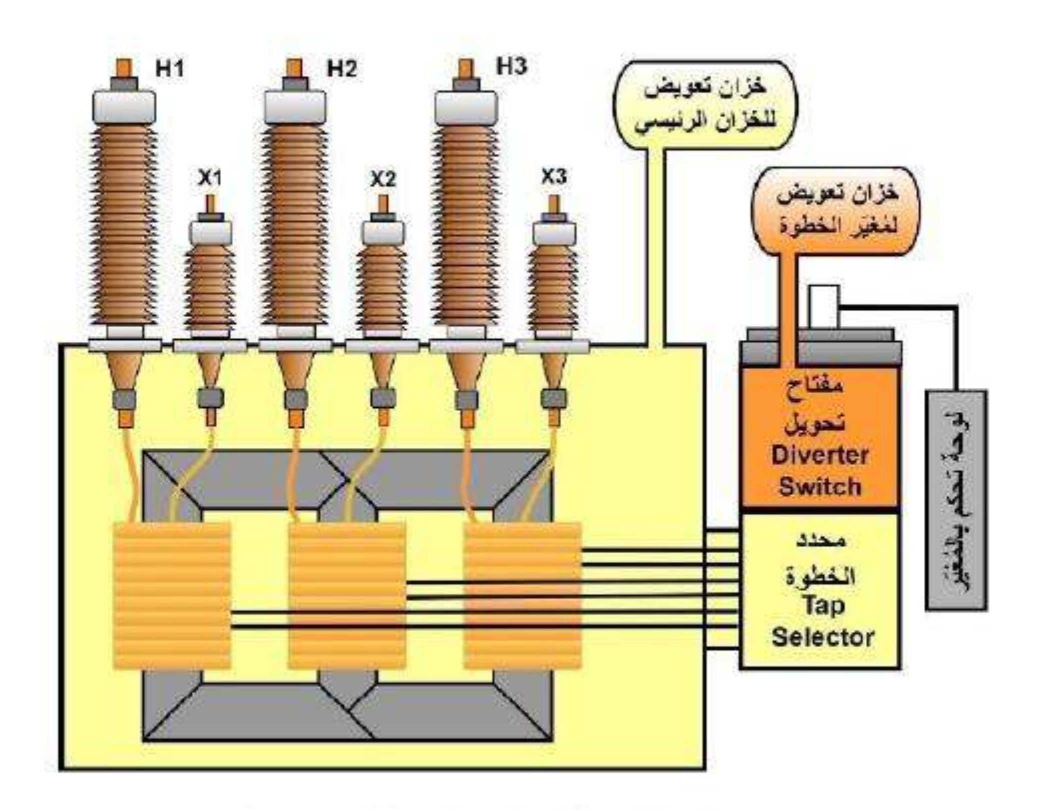
In-tank Selector Switch OLTC

الشكل رقم (55-1)

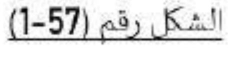


In-tank Diverter Switch OLTC

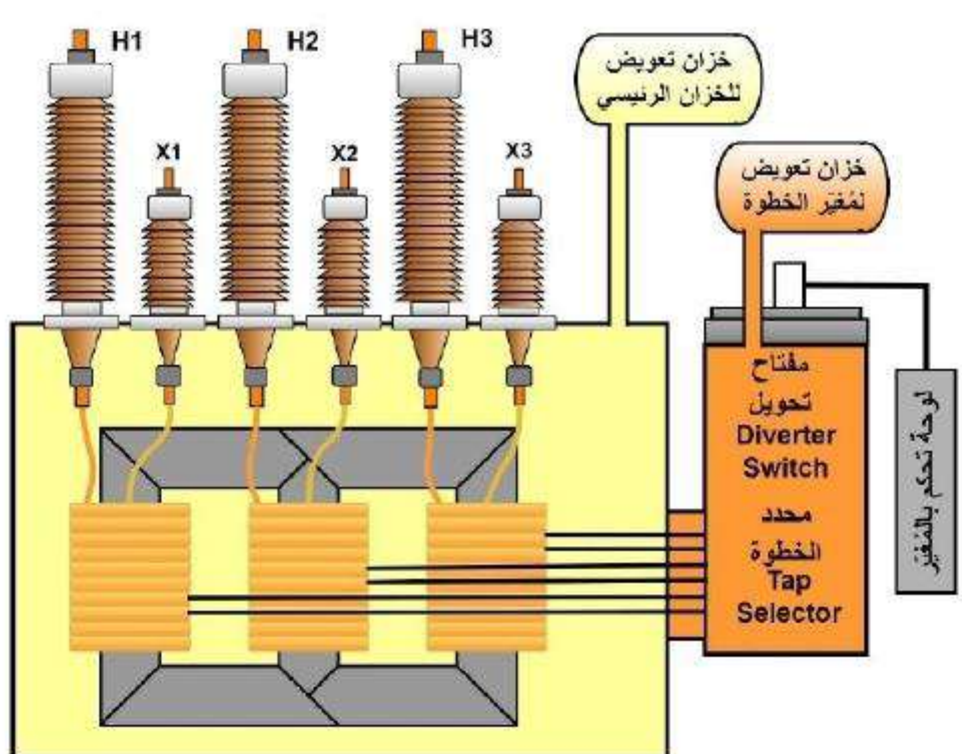
الشكل رقم (56-1)



Bolt-on Diverter Switch OLTC

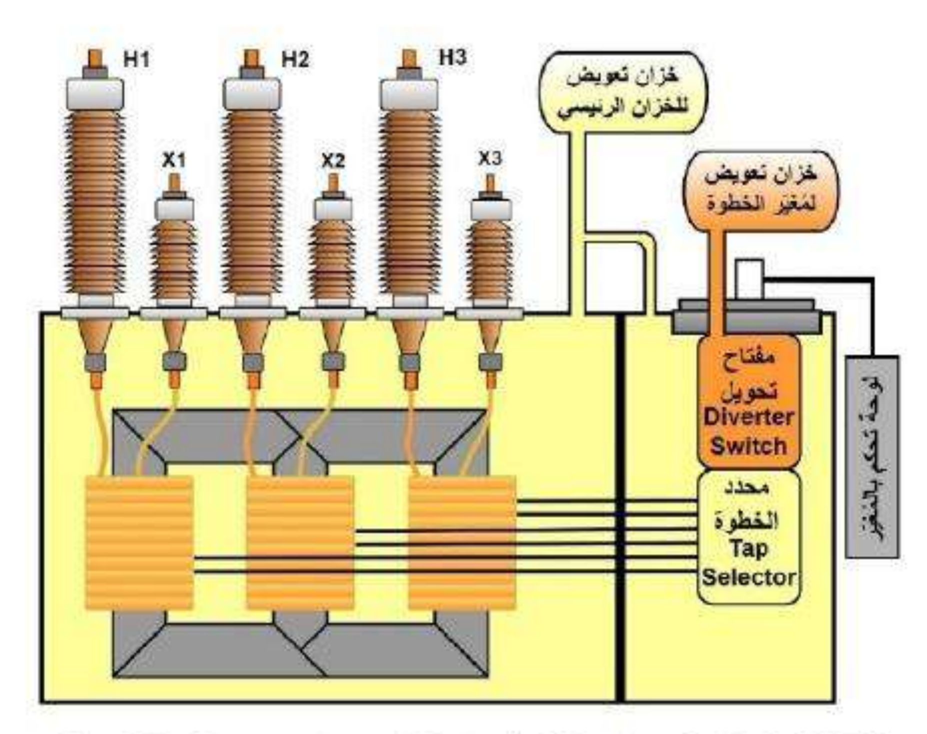


الشكل رقم (1-57)



Bolt-on Selector Switch OLTC

الشكل رقم (1-58)



Double Compartment, In-tank Diverter Switch OLTC

الشكل رقم (1-59)

5.4 نظام العزل - Insulation System

عرّفت اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) المادة العازلة على أنها جميع المواد أو الأجزاء التي تأمّن العزل الكافي بين الأجزاء الموصلة كهربائياً، كما يُمكن تعريف العازل على أنه مادة (**Material**) أو وسط (**Medium**) يتم وضعه بين المواد الموصلة الحاملة لفولتيات ذات مستوى مختلف بحيث يسمح هذا العازل بمرور تيار صغير نسبياً يُمكن إهماله، وفي التصاميم الحديثة للمحولات يتكون نظام العزل من مجموعة من المواد العازلة المختلفة حيث يبين الجدول (**1-4**) مجموعة من المواد العازلة الأكثر إستخداماً في المحولات.

الجدول رقم (1-4)

الرقم	نوع المادة العازلة	الرقم	نوع المادة العازلة
1	Pressboard	8	Pressboard collars and end insulation
2	Kraft paper	9	Inorganic and organic core lamination coating
3	Epoxy powder coating	10	Maple wood structural forms
4	Vulcanized fibre	11	Manila and hemp paper
5	Cotton	12	High density particle-board
6	Enamels	13	Laminated particle-board
7	Liquid insulation (oil)	14	Plastics, Cements adhesive tape, Glass fiber bands, .. etc

• التصنيف الحراري للمواد العازلة

كما ذُكر سابقاً أنه أثناء عمل المحول هنالك مجموعة من الضياعات في حالتي الحمل واللاحمل ناتجة عن القلب الحديدي والملفات والأجزاء الهيكلية من شأنها رفع درجة حرارة هذا المحول فوق درجة حرارة البيئة المحيطة حسب المعادلة التالية:

$$Operatimg\ Temp. = Ambient\ Temp. + Temp. Rise \qquad (1.15)$$

وبما أن نظام العزل يُعتبر من أهم الأنظمة داخل المحول بل وأن العمر الإفتراضي للمحول يتم تحديده تبعاً للعمر الإفتراضي لنظام العزل الخاص به، فلا بُد من المحافظة على درجة حرارة هذا العزل لكي لا تزيد عن الحد الأعلى المسموح به لهذه المادة العازلة. حيث أن تعرض المادة العازلة لدرجات حرارة مرتفعة فوق حدودها التشغيلية سوف يزيد من معدل تهالكها (**Degradation**) مؤدياً لفشلها وفشل المحول بالكامل.

الجدول (**5-1**) يُبين التصنيف الحراري للمواد العازلة المختلفة كما وَرَد في كتاب [المحولات الكهربائية، الجزء الأول، الدكتورة كاميليا محمد]، وبالإعتماد على معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC 60085-2007]**.

الجدول رقم (5-1)

نوع المادة	درجة الحرارة المئوية	تصنيف الحراري
قطن – حرير – ورق – ألياف – سليلوز (بدون تشرّب أو غمر بالزيت)	90°	Y
نفس المواد للتصنيف (**Y**) ولكنها مشرّبة بالراتنج (الرزين) أو الزيت – شرائح خشبية – ورق بطبقة ورنيش	105°	A
ميكا راتنج صناعي - شرائح ورق وقطن مجهزة بالفورمالدهيد	120°	E
ميكا – ألياف صناعية – أسبستوس	130°	B
نفس المواد في التصنيف (**B**) بإضافة مواد رابطة تتحمل الحرارة العالية	155°	F
ألياف صناعية – أسبستوس – ميكا مع إضافة راتنج سيليكوني	180°	H
ميكا – سيراميك – زجاج – كوارتز – أسبستوس – بدون أربطة أو مع راتنج سيليكوني ذو إستقرار حرار عالي جداً	أكبر من **180°**	C

• مكونات نظام العزل وفقاً لموقعها

يتكون نظام العزل في غالبية المحولات الكهربائية المغمورة بالزيت وفقاً لمكان وجوده بالمحول من التالي:

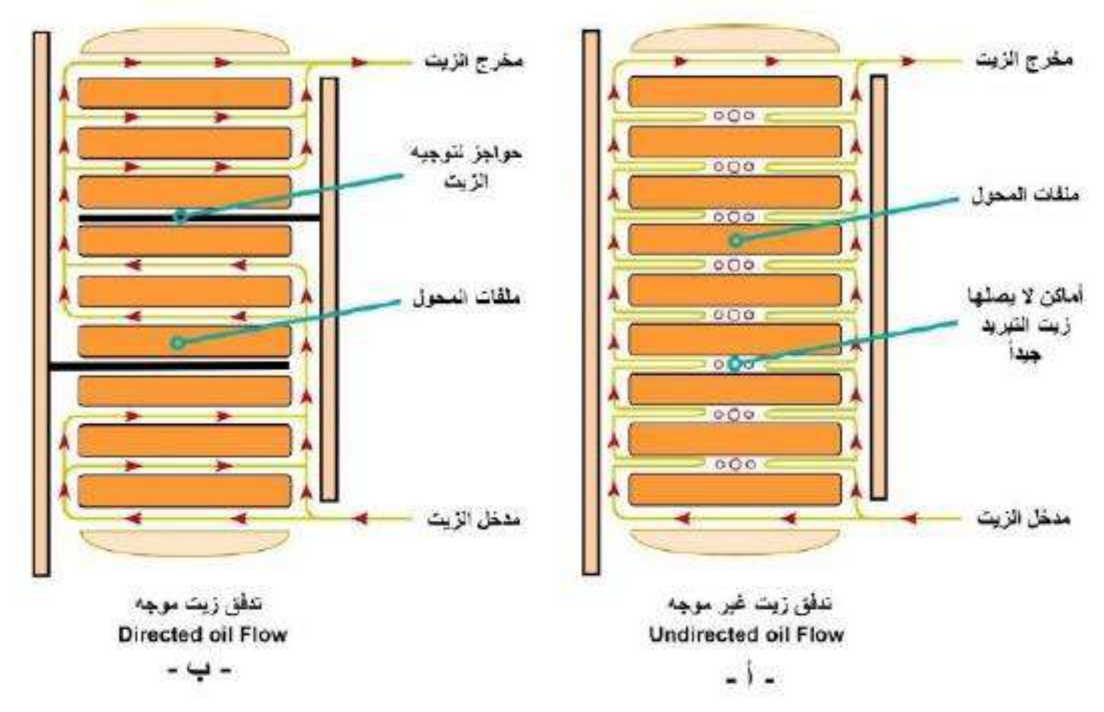
- **عزل رئيسي:** ويتمثل بالزيت إلى جانب الألواح المضغوطة (**Pressboards**) والتي تُمثل جزء العزل الصلب بالمحولات بالإضافة إلى بعض أنواع من الورق، حيث يتواجد هذا العزل:

- بين القلب الحديدي (**Core**) وملفات الفولتية المنخفضة (**LV winding**).
- بين ملفات الفولتية المنخفضة (**LV winding**) وملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**).
- بين أعلى وأسفل الملفات من جهة، والقلب الحديدي (**Core**) من جهة أخرى.
- بين ملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**) و خزان المحول (**Tank**).
- بين القلب الحديدي (**Core**) و خزان المحول (**Tank**).

o **عزل ثانوي:** و يتمثل بالورق المضغوط من الأنواع التالية (**Kraft** أو **Nomex**) أو طلاء مثل (**Enamel**) و يتواجد هذا العزل:

- بين الموصلات (**Conductors**).
- بين اللفات (**Turns**).
- بين الطبقات (**Layers**).
- بين الرقائق المُكوِّنة للقلب الحديدي (**Laminations**).

وفيما يُخص العوازل الصلبة فإلى جانب خصائصها الكهربائية العازلة فإنها أيضاً تلعب دوراً أساسياً في إضفاء قوة ميكانيكية لمواجهة القوى المؤثرة على المحول أثناء نقله و عمله بشكل طبيعي أو أثناء حدوث الأعطال وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية كبيرة، بالإضافه إلى أن العوازل الصلبة تتحكم بشكل وأبعاد ممرات التبريد بين الملفات وكذلك تأمّن وجود هذه الممرات كما هو الحال في طريقة لف موصلات المحول الحلزونية (**Helical**) حيث يتم وضع عوازل صلبة (**Pressboard**) على شكل فواصل صغيرة (**Spacers**) بين اللفات لتأمين ممر تبريد أفقي أو توجد كأشرطة (**Strips**) و فواصل (**Spacers**) بين اللفات (**Turns**) لتأمن ممرات تبريد عامودية (**Ladder duct**).



الشكل رقم (60-1)

- ## أنواع العوازل من حيث الحالة الفيزيائية

يُمكن تصنيف المادة العازلة المستخدمة في المحولات تبعاً لحالتها الفيزيائية كالآتي:

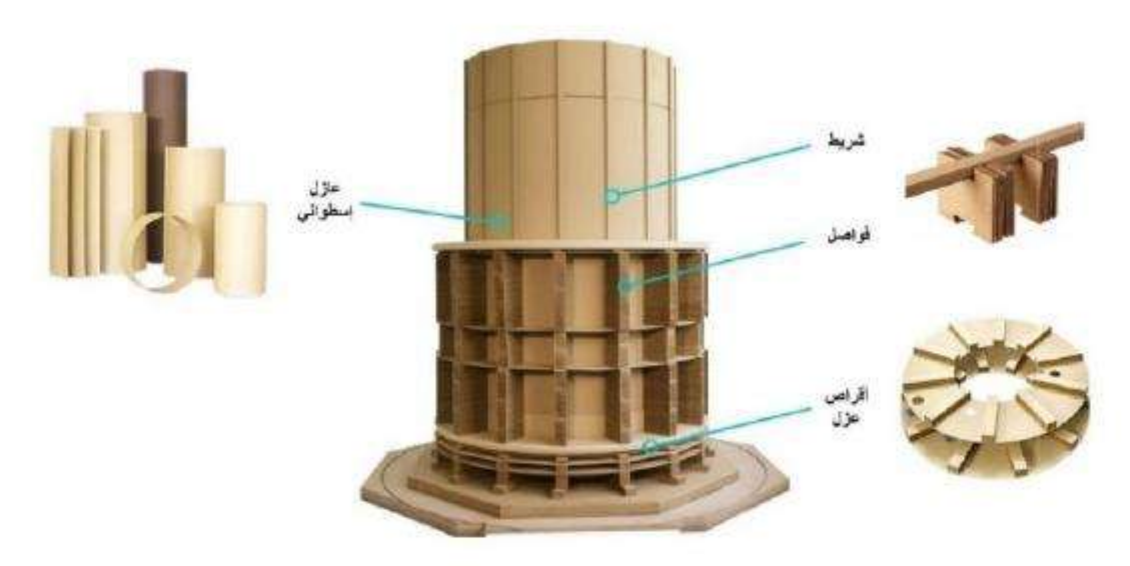
- ### العوازل الصلبة

عند إختيار المادة العازلة للمحول إلى جانب خصائصها الميكانيكية لا بُد من مراعاة بعض الخصائص الكهربائية و التي تتمثل في قوة عزل مرتفعة (**High dielectric strength**) و ثابت عزل (**Dielectric constant**) قريب من نظيره لزيت المحول ومعامل قدرة منخفض (**Low Power Factor**) و كذلك يجب أن تكون المادة العازلة خالية من الجزيئات - الأجسام الصغيرة - الموصلة.

و تنقسم العوازل الصلبة داخل المحول إلى الأنواع التالية:

- **الألواح المضغوطة - Pressboards**: تكون ذو أساس سيليلوزي حيث يتم تصنيع هذا النوع من العوازل من لُب النباتات حيث تدخل في عملية معالجة لتحسين خصائصها الميكانيكية والكيميائية والكهربائية، وتكون ذات صلابة أكبر من الورق المضغوط (**Presspaper**) مما يُعطي شكل ومقاومة ميكانيكية وكهربائية أكبر للملفات، و تكون هذه الألواح المضغوطة على شكل:
  - ✓ **إسطواني (Cylindrical)؛** للعزل بين القلب الحديدي والملفات و بين الملفات المختلفة.
  - ✓ **فواصل (Blocks أو Spacers)؛** للعزل بين الطبقات (**Layers**) وبين الأقراص (**Disks**).
  - ✓ **أشرطة (Strips)؛** حيث توجد بين الطبقات لتأمين ممرات تبريد بين الملفات بالإضافة لحمل قطع العزل الصغيرة أو ما يُسمى بالفواصل (**Blocks** أو **Spacers**).
  - ✓ **أقراص فاصلة (Disk spacer)؛** للعزل بين أقراص الملفات أو بين نهايات الملفات من الأعلى و من الأسفل.

و الشكل (**61-1**) بين الأشكال المختلفة للعوازل الصلبة من النوع (**Pressboards**) داخل المحولات الكهربائية.



الشكل رقم (1-61)

كما وتوجد أشكال أخرى لهذا النوع من العازل، فمنها ما يُستخدم لتأمين العزل اللازم لنهايات الملفات (**Leads**) و نقاط إلتقاء موصلات عوازل الإختراق (**Bushing**) و ملفات المحول كما هو مبين بالشكل (**1-62**).



الشكل رقم (1-62)

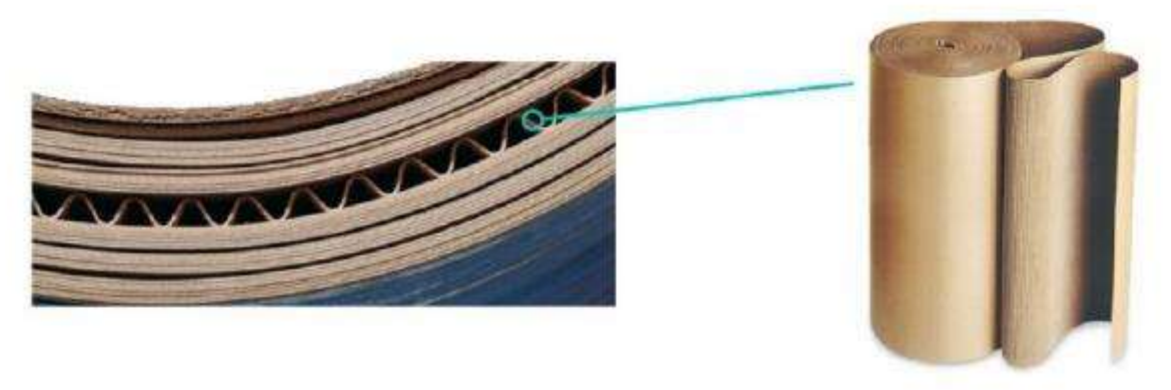
- **الورق المضغوط - Presspaper**: يكون ذو أساس سيليلوزي حيث يتم تصنيع هذا النوع من العوازل من لب النباتات وتدخل في عملية معالجة لتحسين خصائصها الميكانيكية والكيميائية والكهربائية و يتكون من طبقة أو عدة طبقات من الورق وله عدة أنواع:

✓ **ورق الكرافت (Kraft paper)**: يُعتبر من المواد العازلة الرئيسية داخل المحول، ويستخدم لعزل بين الطبقات (**Layers**) في المحول.



الشكل رقم (1-63)

- ✓ **الورق المتعرّج (Corrugated paper)**: حيث يُستخدم هذا النوع من الورق المتعرّج بين الملفات لتأمين ممرات تبريد عامودية عوضاً عن إستخدام الأشرطة (**Strips**) و الفواصل (**Spacers**) سابقة الذكر كما هو موضح في الشكل (**1-64**)، حيث يُستخدم هذا النوع بشكل واسع في المحولات ذات السعة القليلة.



الشكل رقم (1-64)

- ✓ **الورق المُمَوّج أو المُجعد (Crepe paper)**: وهو عبارة عن ورق عزل ذو مرونة عالية وسُمك أقل من الأنواع سابقة الذكر كما هو موضح في الشكل (**1-65**)، حيث انه يُستخدم في عزل الموصلات داخل المحول مثل أطراف الملفات أو الموصلات الواصلة بين الملفات ومُغيّر الخطوة (**Tap-changer**).



الشكل رقم (1-65)

عادة يتم إشباع الورق المضغوط (**Presspaper**) و الألواح المضغوطة (**Pressboards**) بالزيت و ذلك لتجنب وجود فجوات هوائية داخل هذا النوع من العوازل وذلك لرفع خصائصه العازلة ولزيادة قدرته على تبديد الحرارة (**Heat dissipation**)، ويبين الجدول (**1-6**) تأثير غمر الألواح المضغوطة (**Pressboards**)

بالزيت على قوة العزل (Dielectric strength) الخاصة بها، مع التنويه على أن وحدة قياس قوة العزل المُشار إليها بالجدول هي (kV/mm) كيلوفولت لكل مليمتر.

الجدول رقم (6-1)

السماكة، ملم	قوة العزل في الهواء، كيلوفولت/ملم	قوة العزل في الزيت، كيلوفولت/ملم
1	≥12	≥45
2	≥12	≥35
3	≥12	≥35
5	≥12	≥35

كما وتَجدُر الإشارة إلى تجنُب أغلب مُصنّعي المحولات إستخدام العازل الصلب الجاف ذو الأساس السيليلوزي وذلك لما له من خصائص عاشقة للرطوبة (Hygroscopic)، لذلك يتم تجفيفه (Dried) وإشباعه بسائل قد يكون زيت كما ذكر سابقاً أو الورنيش (Varnish) أو الرزين (Resin) للتقليل من إمتصاصه للرطوبة و الحفاظ على خصائصة العازلة. بحيث تُحدد المادة التي يتم إشباع العازل الصلب بها فيما إذا كانت زيت أو ورنيش أو رزين أو غيرها من المواد القدرة الحرارية (Thermal capability) لهذا العازل كما هو مبين في الجدول (5-1).

وتنحصر طرق تجفيف المادة العازلة قبل إشباعها بالزيت بالطرق التالية:

- ✓ تمرير تيار داخل الموصلات مما يرفع درجة حرارتها و حرارة العزل ويُساعد على تخليص العازل من الرطوبة.
- ✓ خفض الضغط داخل المحول مما يساعد على خروج الرطوبة من المادة العازلة (Under vacuum).
- ✓ تدوير هواء ساخن داخل المحول تتراوح درجة حرارته (°120 – °90) درجة مئوية مما يرفع درجة حرارة العازل ويساعد على تخليصه من الرطوبة.
- ✓ تدوير زيت ساخن داخل المحول مما يرفع درجة حرارة العازل ويساعد على تخليصه من الرطوبة.

وهنالك طرق أخرى مثل (Hot oil spray drying) و (Kerosene Vapor Phase Drying - KVPD) و (Low frequency heating).

○ العوازل ذات الأساس غير الصلب

بالإضافة إلى العوازل الصلبة سابقة الذكر، هنالك مواد عازلة ذات أساس غير صلب تكون جنباً إلى جنب مع العوازل الصلبة و تتمثل بالأتي:

- مادة الورنيش **(Varnish)** و المينا **(Enamel)** وغيرها من المواد التي تُستخدم عادة لعزل الموصلات داخل المحول حيث تكون هذه المواد بالأساس بالحالة السائلة ومن ثم تتحول للحالة الصلبة بعد طلائها على الملفات أو رقائق القلب الحديدي المُراد عزلها.

- **الزيت:** ويُمثل أحد أنواع العزل غير الصلب أو السائل داخل المحول.

5.5 زيت المحول – Transformer oil

يتم إحتواء الزيت في الخزان الرئيسي وخزان التعويض للمحول بحيث يقوم هذا الزيت بغمر الجزء الفعّال من المحول والذي يتمثل بالقلب الحديدي والملفات، ولذلك سُميت هذه المحولات بالمحولات المغمورة بالزيت. و تكمُن وظيفة هذا الزيت بالآتي:

- ✓ **العزل؛** يُعد الزيت من المواد العازلة الرئيسية داخل المحول لما له من دور في عزل الأجزاء الحاملة للفولتية أو الموصلة عن بعضها البعض، بالإضافة إلى دور الزيت في إخماد شرارة القوس الكهربائي **(Arc flash)** داخل المحول في حال حدوثها.
- ✓ **منع أكسدة الأجزاء المعدنية داخل المحول؛** يُأمّن الزيت طبقة تُغلّف جدران هذه الأجزاء المعدنية الداخلية للمحول مانعاً أكسدتها.
- ✓ **التبريد؛** يُساعد الزيت على تبديد حرارة الملفات والمواد العازلة الصلبة داخل المحول وذلك بزيادة سعة تبديد الحرارة **(Heat dissipation capacity)**.
- ✓ **أسباب تشخيصية؛** يُعتبر الزيت الوسط الحاضن للغازات الناتجة عن الأعطال داخل المحول وكذلك الجزيئات الناتجة عن تحلل المواد العازلة كظهور مركبات السيليلوز التي تدل على تدهور المادة العازلة داخل المحول، و أيضاً يساعد على قياس نسبة الرطوبة داخل المحول.

• الخصائص المثالية لزيت المحولات

لا بُد من توافر بعض الشروط في الزيوت المُستخدمة في المحولات الكهربائية حتي يتسنى لها القيام بالوظائف المُناطة بها سابقة الذِكر، وتتلخص هذه الخصائص بالآتي:

- ✓ قوة عزل مرتفعة – **High Dielectric Strength**
- ✓ قوة تحمل لإرتفاع الفولتية المفاجئ – **High Impulse Strength**
- ✓ مقاومة مرتفعة لتسرب التيار من خلاله – **High Volume Resistivity**
- ✓ معامل قدرة منخفض – **Low Power Factor**
- ✓ حرارة نوعية و موصلية حرارية مرتفعة – **High Specific Heat and Thermal Conductivity**
- ✓ إستقرار كيميائي – **Chemical Stability**
- ✓ لزوجة منخفضة – **Low Viscosity**
- ✓ درجة حرارة نقطة وميض مرتفعة – **High Flash Point**
- ✓ القدرة على إخماد القوس الكهربائي – **Good Arc Quenching**

بالإضافة إلى أن يكون غير قابل للإشتعال وغير سام وذو سعر رخيص ومتوافر في الأسواق. وكما هو معلوم أن هذه الخصائص من الصعب جداً توافرها في زيت واحد بِعيّنه إلا أن مُصمموا المحولات ذهبوا إلى إستخدام الزيوت التي يتوافر فيها أكبر قدر من هذه الخصائص كما سيتم شرحه لاحقاً.

- **أنواع الزيت المستخدم في المحولات:**

  - **زيت معدني ذو أساس نفطي - Mineral Petroleum Based Oil**

تم إستخدام هذا الزيت في أواخر القرن التاسع عشر (**1880's**) مع بدايات تصنيع المحولات بشكل تجاري، وهو يتكون من خليط هيدروكربوني يتم إشتقاقه من النفط الخام عبر عمليات التقطير. كما و تُعتبر الزيوت المعدنية أكثر أنواع الزيوت إنتشاراً كوسط عازل ووسيلة تبريد في المحولات الكهربائية لما لها من خصائص عازلة ولزوجة منخفضة بالإضافة إلى توافريتها في الأسواق العالمية وسعرها المتدني نسبياً، وتنقسم هذا الزيوت إلى الأنواع التالية:

- زيوت هيدروكربونية مُشبعة (**Saturated hydrocarbons**) مثل الزيت البارافيني (**Paraffins**).
- زيوت أيزو بارافينية (**Iso-Paraffins**).
- زيوت نافثينية (**Naphthenes**).
- زيوت هيدروكربونية غير مُشبعة (**Unsaturated hydrocarbons**) مثل الزيت العِطري (**Aromatics**).

وفي الوقت الحاضر ونظراً للتأثير السلبي للزيوت المعدنية على البيئة تم وضع مجموعة من المتطلبات والإجراءات عند التعامل مع هذا النوع من الزيوت و تصنيعه.

  - **زيت أسكاريل - Askarels**

الأسكاريل (**Askarels**) هو اسم عام يُطلق على زيت العزل الإصطناعي (**Chlorinated hydrocarbon**) أو (**Polychlorinated biphenyls – PCB**) وله أسماء تجارية عدة منها (**Pyranol, Pyroclor & Clophen**)، حيث تم إستخدامه في أوائل القرن العشرين (**1930's**) كبديل لزيت المحولات المعدني (**Mineral oil**) نظراً لعدم قابليته للإشتعال (**Non-flammable**) مقارنة مع الزيوت المعدنية، بالإضافة إلى سعره المتدني نوعاً ما.

إلا أن سُمّيّة هذا النوع من الزيوت (**Askarels – PCB**) وتأثيره السلبي على صحة الإنسان و الحيوان إلى جانب أضراره البيئية أدى إلى تظافر الجهود للتخلص منه ومن الزيوت المعدنية (**Mineral oil**) الملوثة به، حيث شرعت بعض المنظمات الدولية في سبعينيات القرن المنصرم (**1970's**) لوضع قوانين للحد من إنتشار هذا النوع من الزيوت كما هو الحال حيث ألزم معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) الشركات المُصنعة للمحولات بوضع جملة على لوحة البيانات (**Name Plate**) الخاصة بالمحول تنص على أن المحول غادر المصنع بنسبة (**PCB**) أقل من (**2 ppm**) في الزيت. كما و تَجدُر الإشارة إلى أن

مصطلح الزيت المعدني الملوث بالـ(**PCB**) يُطلق على الزيت المعدني الذي يَحوي ما مقداره (**50 ppm**) أو أكثر من الـ(**PCB**).

- ### موائع السيليكون - Silicon Fluids

الموائع السيليكونية و بشكل أدق تُسمى (**polymerized siloxanes**) أو (**polysiloxanes**) تتكون من خليط من بوليمرات عضوية وغير عضوية بحيث يكون الجزء غير العضوي مكون من عنصري السيليكون (**Si**) و الأكسجين (**O**).

بدأ إستخدام هذه الموائع في المحولات في نهاية سبعينيات القرن الماضي (**1970's**) بشكل أساسي كأحد بدائل زيت الأسكاريل (**Askarels – PCB**) لما له من درجة حرارة نقطة إشتعال (**Fire point**) أعلى مما يُقلل من خطر حدوث الحرائق، بالإضافة إلى مقاومته للأكسدة بشكل مرتفع. ولكن لم يُحقق هذا النوع من الزيوت انتشاراً كبيراً إلا في المحولات المُستخدمة في القطارات أو ما يُسمى بمحولات الجَرّ (**Traction transformers**) و في محولات التوزيع منخفضة السِعة (**Low Capacity**) بالإضافة إلى المحولات المستخدمة في التطبيقات ذات الحرارة المرتفعة خشية حدوث الحرائق.

و من أوجه قُصور هذا النوع من الزيوت اللزوجة العالية مما يعني قدرة على التبريد منخفضة، بالإضافة إلى معدل التحلل المنخفض (**Low Biodegradability**) مما يعني أضرار بيئية مرتفعة في حال تسربه كما ويُشكل التخلص (**Disposal**) من هذا الزيت عائقاً أخر لإستخدامه نتيجة لأضراره البيئية سابقة الذِكر وكذلك ضرورة تغيير كامل الزيت المُتقادم وذلك لعدم عدم إمكانية معالجته.

حديثاً قامت اليابان بتطوير نوع من الزيت السيليكوني قليل اللزوجة (**Low-Viscosity Silicone fluid**) و تم إستخدامه في محولات القوى ذات السعة قرابة الـ(**30 MVA**) بمستوى فولتية (**66kV**)، وقبل اليابان لا يُعرَف أي استخدام للزيت السيليكوني في محولات القوى الكهربائية.

- ### إسترات إصطناعية - Synthetic esters

تمت صياغة تركيبة هذا النوع من الإسترات المُكوَّن من رابطة كيميائية تتشكل نتيجة لتفاعل الكحول مع الأحماض الدهنية (**Fatty acids**) لأول مرة في نهاية سبعينيات القرن الماضي (**1970's**) إلى أن تم إستخدامه بشكل تجاري لأول مره في بداية تسعينيات القرن نفسه في ألمانيا ومن ثم تم إعتماده من قبل شركة توزيع الكهرباء الأردنية (**JEPCO**) في عام (**1995**) لمحولات التوزيع السكنية لما له من درجة حرارة نقطة إشتعال (**Fire point**) مرتفعة مما يُقلل من خطر حدوث الحرائق، بالإضافة إلى مقاومته للأكسدة بشكل مرتفع و معدل تحلل (**Biodegradability**) أعلى من الزيوت المعدنية والسيليكونية مما يجعله صديق للبيئة أكثر، لذلك شاع استخدام هذه الزيوت في المحولات المُستخدمة في التطبيقات ذات الحرارة المرتفعة وأيضاً في الأماكن المأهولة بالسكان خوفاً من الحرائق بالإضافة إلى الأماكن التي يُعتبر تلوث البيئة فيها من الأمور الخطيرة جداً. ومن الأمثلة على الإسترات الإصطناعية زيت الـ(**MIDEL 7131**).

○ إسترات طبيعية - Natural esters

بدأت الدراسات حول هذا النوع من الزيوت في بداية تسعينيات القرن الماضي (**1990's**) إلى أن تم إستخدامه بشكل تجاري لأول مره في بداية القرن الحالي. وأيضاً يُسمى بالزيت النباتي (**Vegetable oil**) و تتكون هذه الزيوت النباتية في تركيبها الأساسي من ثلاثي الغلسيريد (**Tri-glycerides**) حيث يتم إنتاجها من الصويا أو دوار الشمس، وتُعتبر إحدى بدائل الزيوت المعدنية والسيليكونية المُستخدمة في المحولات لما لها من درجة حرارة نقطة إشتعال مرتفعة (**High Fire point**) مما يُقلل من خطر حدوث الحرائق، بالإضافة إلى مُعدل تحلل (**Biodegradability**) أعلى من الزيوت المعدنية والسيليكونية مما يجعله صديق للبيئة أكثر، لذلك شاع استخدام هذه الزيوت في المحولات المستخدمة في التطبيقات ذات الحرارة المرتفعة وأيضاً في الأماكن المأهولة بالسكان خوفاً من الحرائق بالإضافة إلى الأماكن التي يُعتبر تلوث البيئة فيها من الأمور الخطيرة جداً كنظيرتها الإصطناعية. كما وتتفق الإسترات الإصطناعية والطبيعية في الخصائص سابقة الذكر إلا أنها تفترق في أن الإسترات الطبيعية تمتلك خصائص غير مستقرة إتجاه التأكسد (**Oxidation**).

ومن الجدير بالذكر أن الإسترات الطبيعية و الإصطناعية يُمكنها إمتصاص كمية رطوبة أكبر من نظيرتها المعدنية والسيليكونية دون التأثير على خصائص هذه الزيوت العازلة للكهرباء، بالإضافة إلى أنها صديقة للبيئة في حال تسربت من المحولات أو في حال تم التخلص منها على النقيض من الزيوت المعدنية والسيليكونية والأسكاريل وذلك لقابليتها المرتفعة على التحلل بالإضافة لعدم سُمّيتها، كما وأنها تمتلك درجة حرارة نقطة إشتعال مرتفعة (**High Fire point**) مما يجعلها أكثر أماناً إتجاه الحرائق. ويبين الجدول (**1-7**) إستخدامات هذه الزيوت:

الجدول رقم (**1-7**)

نوع المحول	نوع الزيت			
	معدني	سيليكوني	إستر إصطناعي	إستر طبيعي
محول قدرة	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	لا يُستخدم حالياً	يُستخدم بشكل **غير** واسع الإنتشار	يُستخدم بشكل **غير** واسع الإنتشار
محول توزيع	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار
محول جرّ	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	لا يُستخدم حالياً
محول قياس	يُستخدم بشكل واسع الإنتشار	لا يُستخدم حالياً	لا يُستخدم حالياً	لا يُستخدم حالياً

و الجدول **(8-1)** يأمن مقارنة بين خصائص أنواع الزيوت المختلفة حتى يَسهُل فهم هذه الخصائص وفقاً للمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **CIGRE**:

الجدول رقم (8-1)

وجه المقارنة / نوع الزيت	زيت معدني	زيت سيليكوني	إستر إصطناعي	إستر طبيعي	الأسكاريل
النوع	نفط خام مكرر و مقطر	إصطناعي	إصطناعي	زيت نباتي مكرر	إصطناعي
المكون الرئيسي	خليط هيدروكربوني معقد	di-alkyl silicone polymer	Pentaerythritol tetra ester	إستر طبيعي ذو أساس نباتي	polychlorinated biphenyl
المصدر	تصفية الزيت	مواد كيميائية	مواد كيميائية	يستخرج من المحاصيل	مواد كيميائية
قابلية التحلل	بطيء	بطيء جداً	سريع	سريع جداً	بطيء
إستقرارية إتجاه التأكسد	مستقر نوعا ما	مستقر	مستقر	غير مستقر	مستقر
فولتية الإنهيار 2.5mm gap (IEC) kV	>70	50	>75	>75	>30
التشبع بالماء عند درجة حرارة 23° ppm	55	220	2600	1100	35
درجة حرارة نقطة الوميض C°	160° إلى 170°	>300°	>250°	>300°	لا يوجد
درجة حرارة نقطة الإشتعال C°	170° إلى 180°	>350°	>300°	>350°	لا يوجد
تصنيف الإشتعال	O	K	K	K	L
درجة حرارة نقطة الإنصباب	-50°	-50°	-45°	-15°	-45°
السعر النسبي	1	10	4 - 8	2	5

5.6 نظام التبريد - Cooling system

إن ارتفاع درجة الحرارة داخل المحول عن المعدلات الطبيعية يؤدي إلى تقليل العمر الإفتراضي للمحول وذلك بزيادة معدل تهالك أو تقادم (**Ageing Rate**) أحد أهم مكونات المحول الداخلية وهو ورق العزل، وتبعاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **IEEE** فإن زيادة درجة حرارة الـ(**Hot spot**) للمحول بما مقداره (**6°**) درجات مئوية سيؤدي إلى إنخفاض عمر المحول الإفتراضي للنصف. ومما سبق يُمكن ملاحظة ربط العمر الإفتراضي للمحول كُكل بالعمر الإفتراضي لورق العزل وذلك لأن إنهيار هذا الورق يعني إنهيار المحول ككل بالإضافة إلى عدم إمكانية إستبدال هذا الورق بسهولة كباقي أجزاء المحول في حال فشلها.

و يبقى التساؤل المطروح من أين تأتي هذه الحرارة؟.... و للإجابة على هذا التساؤل يمكن الرجوع إلى الشرح السابق و الخاص بضياعات المحولات الواقعية والتي تنقسم إلى ضياعات حمل و ضياعات لاحمل و هما على حدٍ سواء المصدر الرئيسي للحرارة داخل المحول بالإضافة لدرجة حرارة البيئة المحيطة، لذلك لا بد من وجود نظام تبريد لتبديد هذه الحرارة المُتكوِّنة.

- **مكونات نظام التبريد**
  - **زيت التبريد:** يتم إختيار زيت المحول بعناية فائقة فإلى جانب خصائصه الكهربائية العازلة يتم مراعاة خصائص أخرى كاللزوجة وغيرها من الخصائص الفيزيائية والكيميائية التي تلعب دوراً مهماً في عملية التبريد، كما ويُعتبر الزيت وسط التبريد الداخلي للمحول حيث يَكون على تماس مباشر مع الملفات والقلب الحديدي (مصدر الحرارة داخل المحول) مما يُسهل عملية التبادل الحراري.
  - **الخزان الرئيسي:** هنالك عدة أنواع للخزانات الرئيسية للمحولات وفقاً لكيفية التبريد ومنها:
    - **الخزان ذو الجدران المُسطحة - Plain sheet steel tank:** في هذا النوع من الخزانات يُكتفى بتبادل الحرارة بين الزيت الداخلي والهواء الخارجي عبر جدران الخزان الخارجية فقط دون الحاجة لمبادل حراري مُدمج أو مُنفصل عن جسم الخزان كما هو مبين في الشكل (**1-66**) وعادة ما يكون من النوع ذو حافة تثبيت علوية (**High Flange Tank Design**)، و هذا النوع من الخزانات واسع الإنتشار لمحولات التوزيع الصغيرة جداً حوالي (**50kVA**) كيلو فولت أمبير أو أقل.



الشكل رقم (**1-66**)

- **الخزان ذو الأنابيب الجانبية - Tubed tank**: في هذا النوع من الخزانات يتم تبادل الحرارة بين الزيت الداخلي والهواء الخارجي عبر جدران الخزان الخارجية بالإضافة إلى مجموعة من الأنابيب المُدمجة بجدران خزان المحول الداخلية عن طريق اللحام (**Welding**) كما هو مبين في الشكل (**1-67**)، وهذا النوع من الخزانات واسع الإنتشار لمحولات التوزيع كافة على إختلاف سعتها ما عدا الصغيرة جداً منها والذي يتم إستخدام الخزان ذو الجدران المُسطحة (**Plain tank**) سابق الذكر.



الشكل رقم (**1-67**)

- **الخزان ذو المُشع - Radiator tank**: يُعد أحد بدائل الخزان السابق – ذو الأنابيب-، وفي هذا النوع من الخزانات يتم تبادل الحرارة بين الزيت الداخلي والهواء الخارجي عبر جدران الخزان الخارجية بالإضافة إلى مُشع (**Radiator**)، حيث يتم وصله بجدران خزان المحول عن طريق البراغي عبر صمامات لحالات الصيانة كإستبدال المُشع كما هو مُبين في الشكل (**1-68**)، وهذا النوع من الخزانات واسع الإنتشار للمحولات ذات السِعة الصغيرة والمتوسطة.



الشكل رقم (**1-68**)

- **الخزان ذو الجدران المتعرجة - Corrugated tank**: يُعد بديل للخزان ذو الأنابيب (**Tubed tank**)، و المبين في الشكل (**1-69**).



الشكل رقم (**1-69**)

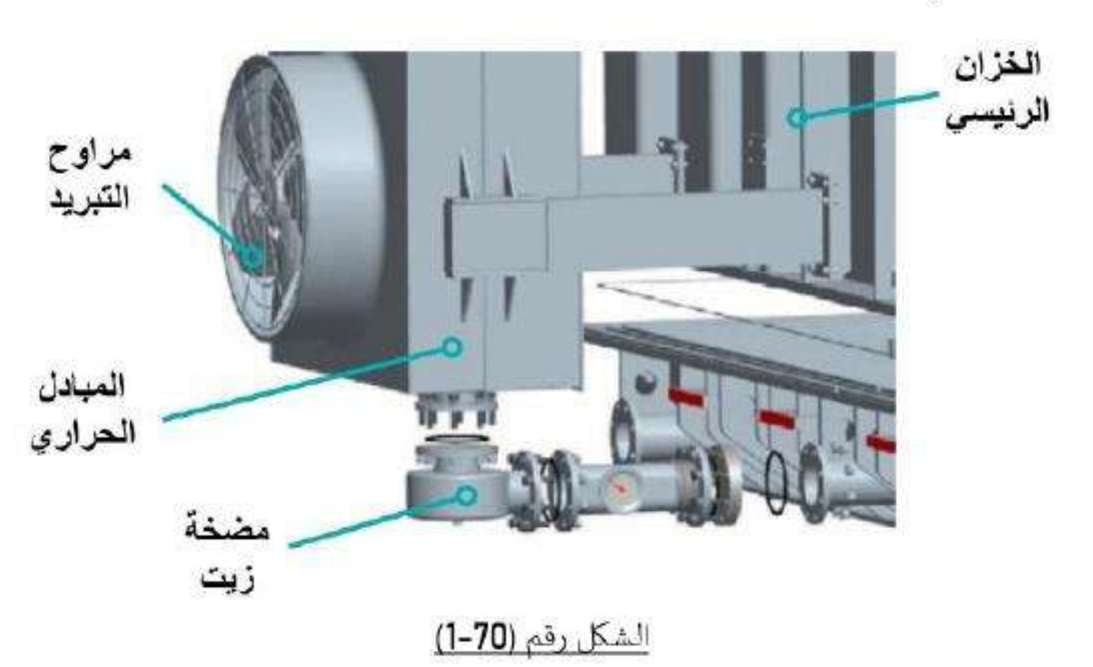
- **الخزان ذو المبادل الحراري المنفصل - Separated cooler tank**: يُعد هذا النوع الأكثر إنتشاراً خاصة للمحولات ذات السِعات الكبيرة (**Large Capacities**)، بحيث يكون المبادل الحراري مُنفصل عن جسم الخزان ويتم وصلهما بأنابيب كبيرة قد تحتوي على مضخات في بعض التطبيقات كما سيتم الشرح لاحقاً.

  - **المُبادل الحراري:** هو ذلك الجُزء من النظام الذي يتم من خلاله تبادل الحرارة بين وسط التبريد الداخلي – الزيت - و وسط التبريد الخارجي - هواء أو ماء - وله عدة أنواع كالمُشعّ (**Radiator**) والذي يُستخدم عادة مع طريقة التبريد (**ONAN** أو **ONAF**)، والنوع الثاني هو المُبادل الحراري زيت/هواء (**Oil/Air heat exchanger**) و يُستخدم عادة مع طريقة التبريد (**OFAF** و**ODAF**)، و النوع الثالث المُبادل الحراري أو ما يُسمى بالمُبرد زيت/ماء (**Oil/Water heat exchanger or Cooler**) ويُستخدم عادة مع طريقة التبريد (**OFWF** و**ODWF**).

  - **المراوح:** تُستخدم للتدوير القَسري (**Forced**) لوسط التبريد الخارجي – الهواء -، بحيث يتم تركيبها مع المُشعّ (**Radiators**) في طريقة التبريد (**ONAF**) أو مع المُبادل الحراري زيت/هواء (**Oil/Air heat exchanger**) في طريقة التبريد (**OFAF** أو**ODAF**). وعادةً ما يتم التحكم بتشغيل و إطفاء هذه المراوح بأمر من مؤشر درجة حرارة الزيت (**OTI**) أو مؤشر درجة حرارة الملفات (**WTI**) أو عن طريق مُرحّل خاص وفقاً لحمل المحول فمثلاً لو زاد الحمل عن (**70%**) من الحمل الكُلي يُصدر هذا المُرحل إشارة عمل للمراوح والعكس صحيح.

  - **المضخة:** تُستخدم للتدوير القَسري (**Forced**) لوسط التبريد الداخلي – الزيت - أو الخارجي – الماء -، بحيث يتم تركيبها مع المُشعّ (**Radiators**) في طريقة التبريد (**OFAF**) أو مع المُبادل

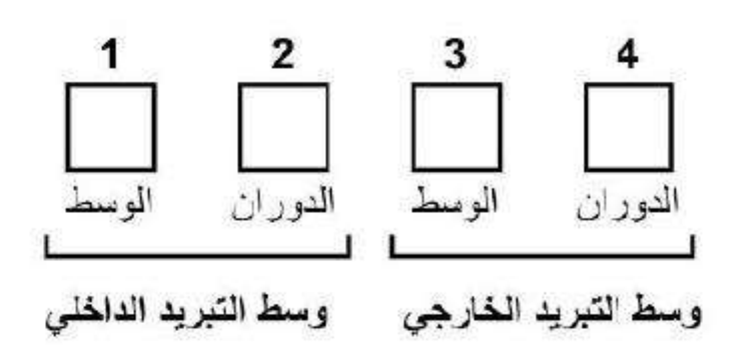
الحراري زيت/هواء (**Oil/Air heat exchanger**) في طريقة التبريد (**OFAF** أو **ODAF**) أو مع المُبادل الحراري زيت/ماء (**Oil/Water heat exchanger**) في طريقة التبريد (**OFWF** أو **ODWF**).



الشكل رقم (**1-70**)

- ## الترميز الخاص بطُرق التبريد

بالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) و اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) فإن طريقة التبريد للمحولات الكهربائية يتم الإشارة لها برمز (**Code**) مُكوّن من أربعة حروف وفقاً للشرح الآتي بحيث يتم إختيار طريقة التبريد المناسبة للمحول بالإعتماد على نوع التطبيق المُستخدم فيه المحول بالإضافة إلى حجم المحول وكمية الحرارة المُراد تبديدها.



الجدول رقم **(9-1)**

<table dir="rtl">
<tr><td rowspan="8">وسط التبريد الداخلي</td><td colspan="2">**الحرف الأول:** ويَرمُز لوسط التبريد الداخلي للمحول والذي يكون على تماس مباشر مع الملفات</td></tr>
<tr><td>O</td><td>زيت معدني أو إصطناعي ذو درجة حرارة نقطة إشتعال (**Fire point**) أقل أو تساوي **°300** درجة مئوية.</td></tr>
<tr><td>K</td><td>سائل عزل ذو درجة حرارة نقطة إشتعال (**Fire point**) أكثر من **°300** درجة مئوية</td></tr>
<tr><td>L</td><td>سائل عزل ذو درجة حرارة نقطة إشتعال (**Fire point**) لا يُمكن قياسها.</td></tr>
<tr><td colspan="2">**الحرف الثاني:** ويَرمُز لآلية تدوير وسط التبريد الداخلي للمحول</td></tr>
<tr><td>N</td><td>يتم تدوير سائل التبريد بشكل طبيعي (**Natural**) دون الحاجة لمضخة وفقاً لظاهرة الحمل الطبيعي (**Thermosiphon effect**) لكل من جهاز التبريد – المُشع - و الملفات.</td></tr>
<tr><td>F</td><td>يتم تدوير سائل التبريد بشكل قَسري (**Forced**) داخل جهاز التبريد – المُشع - بإستخدام مضخة – زيت -، وبشكل طبيعي (**Natural**) في الملفات.</td></tr>
<tr><td>D</td><td>يتم تدوير سائل التبريد بشكل قَسري (**Forced**) داخل جهاز التبريد – المُشع - بإستخدام مضخة – زيت -، ويتم توجيه (**Directed**) الزيت الخارج من المُشع في الملفات.</td></tr>
<tr><td rowspan="6">وسط التبريد الخارجي</td><td colspan="2">**الحرف الثالث:** ويَرمز لوسط التبريد الخارجي للمحول</td></tr>
<tr><td>A</td><td>هواء</td></tr>
<tr><td>W</td><td>ماء</td></tr>
<tr><td colspan="2">**الحرف الرابع:** ويَرمز لآلية تدوير وسط التبريد الخارجي للمحول</td></tr>
<tr><td>N</td><td>يتم تدوير مائع التبريد بشكل طبيعي (**Natural**) دون الحاجة لمضخة – ماء - أو مراوح – هواء -.</td></tr>
<tr><td>F</td><td>يتم تدوير مائع التبريد بشكل قَسري (**Forced**) بإستخدام مضخة – ماء - أو مراوح – هواء -.</td></tr>
</table>



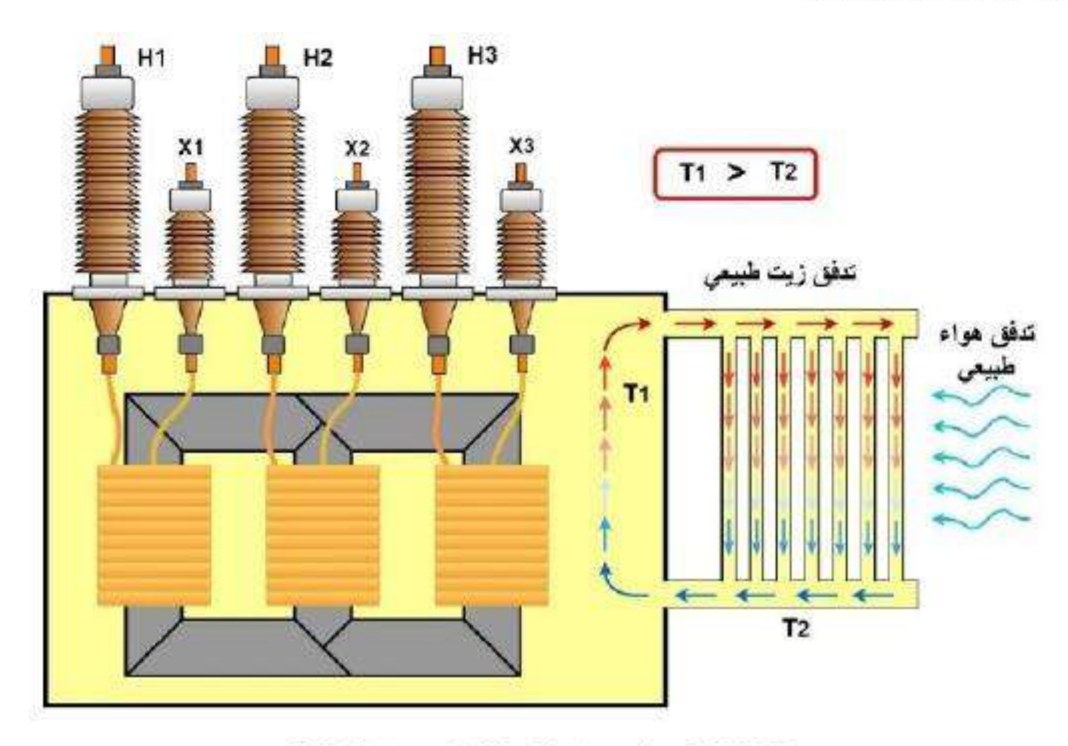
ملحوظة (11-1): هنالك بعض أنواع التبريد الخاصة و تُستخدم مع المحولات المَعزولة بالغاز مثل غاز سداسي فلوريد الكبريت (SF_6) وتكون على النحو التالي (**GNAN** و **GDAN** و **GDAF** و **GDWF**) حيث (**G**) يُقصد بها وسط العزل الداخلي للمحول وهو غاز الـ (SF_6) و فيما يَخُص باقي الرموز يُمكن معرفتها بالرجوع للجدول (**9-1**) سابق الذِكر.

- **طُرق التبريد**

إعتماداً على طريقة الترميز المذكورة أعلاه يُمكن إستخلاص وشرح آلية عمل أكثر طرق التبريد للمحولات شيوعاً كالآتي:

- **طُرق التبريد – ONAN و ONAF**

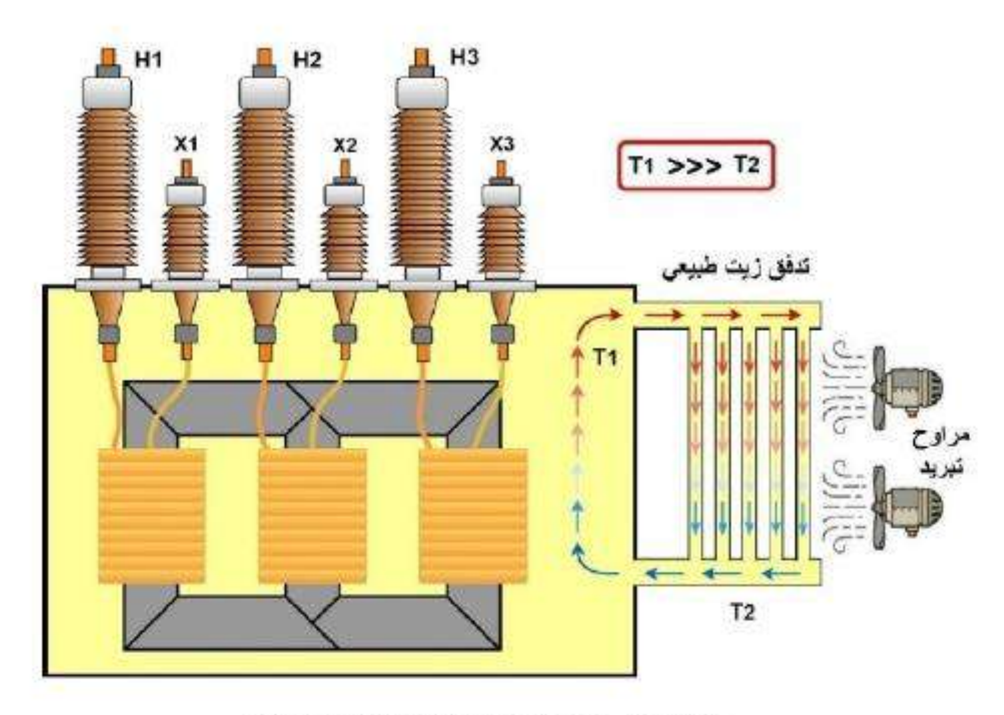
تُعتبر طريقة التبريد (**Oil Natural Air Natural - ONAN**) من أبسط طُرق التبريد و أكثرها إنتشاراً حيث يتم التبريد نتيجة للدوران الطبيعي للزيت وفقاً لما يسمى بالـ(**Thermosiphon effect**) داخل المحول نتيجة لوجود فرق في درجة حرارة الزيت (**ΔT**) داخل خزان المحول (**T1**) و في المبادل الحراري – المشعّ - (**T2**) كما يظهر بالشكل (**1-71**).



Oil Natural Air Natural - ONAN

الشكل رقم (**1-71**)

و بإضافة مراوح للمبادل الحراري – المُشعّ - لتصبح طريقة التبريد (**Oil Natural Air Forced - ONAF**)، يزداد الفرق في درجة حرارة الزيت (**ΔT**) داخل خزان المحول (**T1**) و في المبادل الحراري – المُشعّ - (**T2**) وذلك نتيجة لإنخفاض درجة الحرارة (**T2**) مما يَعني زيادة في معدل التدفق (**Flow rate**) أثناء الدوران الطبيعي للزيت و زيادة التبريد كما يَظهر في الشكل (**1-72**).

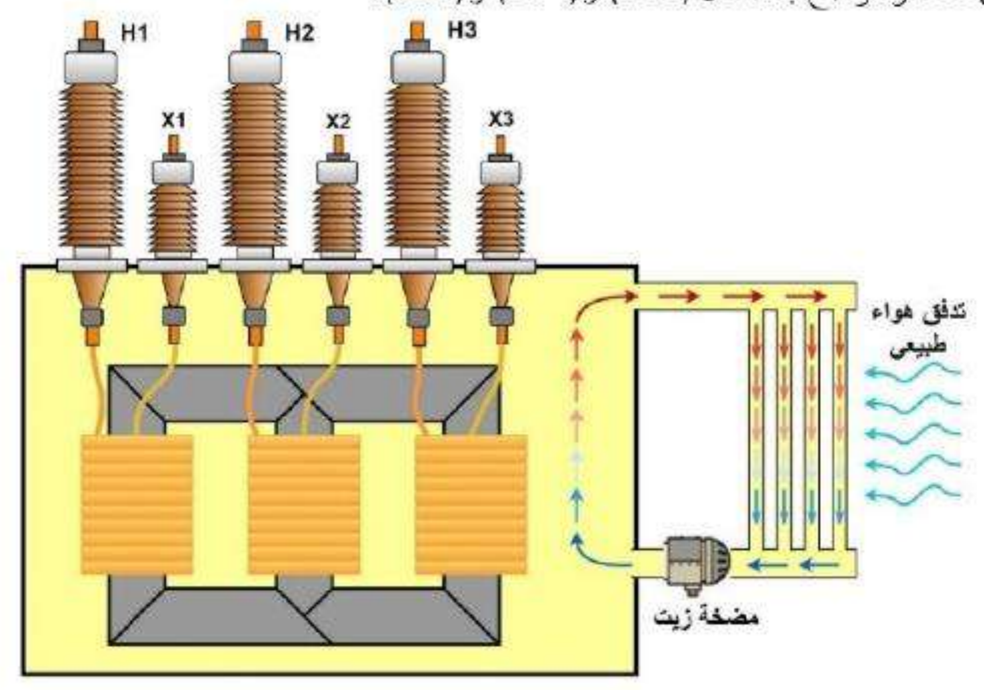


Oil Natural Air Forced - ONAF

الشكل رقم (**1-72**)

- **طُرق التبريد – OFAN و OFAF و OFWF**

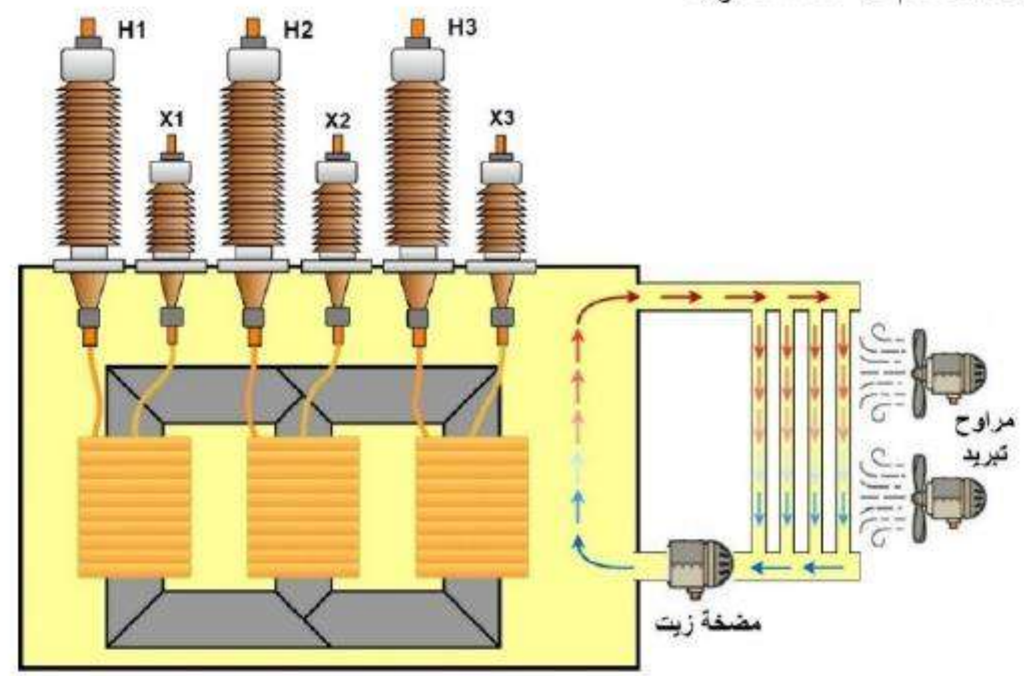
في هذه الطُرق من التبريد يكون دوران الزيت داخل المحول قَسري (**Oil Forced – OF**) عبر مضخات زيت مُثبتة بين المبادل الحراري والخزان الرئيسي للمحول و يكون هذا الدوران غير مُوجّه (**Non-directed**) كما هو موضح بالأشكال (**1-73**) و (**1-74**) و (**1-75**).



Oil Forced Air Natural - OFAN

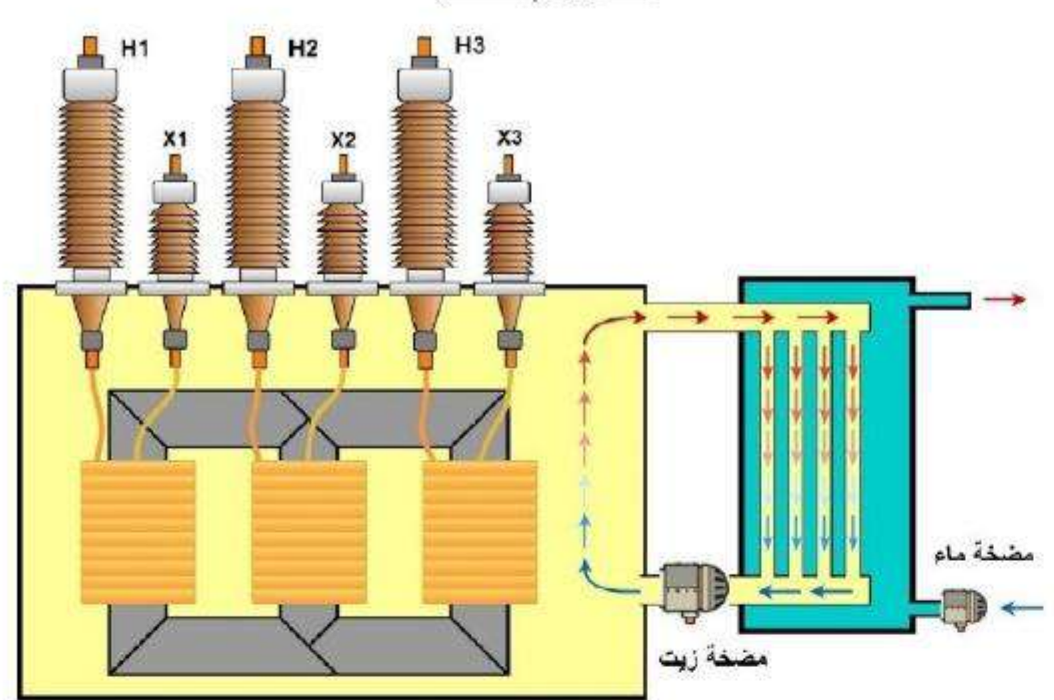
الشكل رقم (**1-73**)

أما فيما يَخُص وسط التبريد الخارجي فإما أن يكون هواء طبيعي (Air Natural – AN) كما هو مُبين في الشكل (1-73)، أو هواء مدفوع بمراوح أي بشكل قَسري (Air Forced – AF) كما هو مُبين في الشكل (1-74)، أو ماء ذو دوران قَسري (Water Forced – WF) كما هو مُبين في الشكل (1-75) وذلك يعتمد على التطبيق المستخدم فيه هذا المحول.



Oil Forced Air Forced - OFAF

الشكل رقم (1-74)



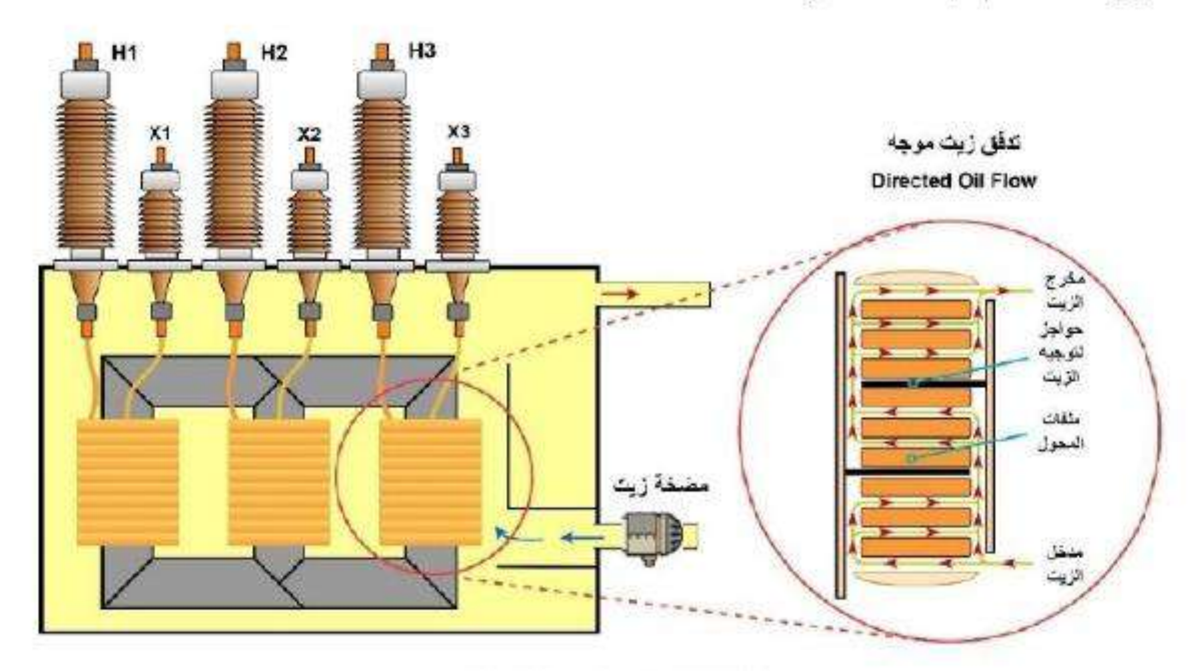
Oil Forced Water Forced - OFWF

الشكل رقم (1-75)

○ طُرق التبريد – ODAN و ODAF و ODWF

في هذه الطُرق من التبريد يكون دوران الزيت داخل المحول قسري (**Oil Forced – OF**) عبر مضخات زيت مُثبتة بين المبادل الحراري والخزان الرئيسي للمحول و يكون هذا الدوران مُوجه (**directed**) على الملفات الرئيسية ضمن مسارات محددة لزيادة كفاءة التبادل الحراري بين الملفات وزيت المحول كما هو موضح في الشكل (**76-1**).

أما فيما يخص وسط التبريد الخارجي فإما أن يكون هواء طبيعي (**Air Natural – AN**) أو هواء مدفوع بمراوح (قسري) (**Air Forced – AF**) أو ماء ذو دوران قسري (**Water Forced – WF**) وذلك يعتمد على التطبيق المستخدم فيه هذا المحول.



Oil Directed - ODXX

الشكل رقم (**76-1**)

• طُرق التبريد وفقاً لقدرة المحول:

○ محولات القدرة الصغيرة (أقل من 50MVA)

مع هذا النوع من المحولات عادةً ما يتم إستخدام طريقة التبريد (**ONAN**)، وتكمُن حسنات هذه الطريقة في التبريد بأنها لا تحتاج إلى صيانة بالإضافة إلى عدم حاجتها إلى مصدر كهربائي إضافي (للمراوح مثلاً). كما وتبقى الفرصة متاحة لإضافة مراوح مستقبلاً إذا لزم الأمر.

○ محولات قدرة متوسطة (من 50MVA إلى 150MVA)

مع هذا النوع من المحولات عادةً ما يتم الجمع بين طريقتي التبريد (**ONAN** و **ONAF**) في المحول الواحد، بحيث يبدأ المحول عمله على طريقة التبريد (**ONAN**) ومن ثم نتيجة لإرتفاع حرارة زيت أو ملفات المحول

أو تحميل المحول فوق حد معين قد يكون من **70**% إلى **80**% من الحمل الكامل تعمل المراوح المُثبتة على المبادل الحراري – المُشعّ - لينتقل المحول إلى طريقة التبريد (**ONAF**).

- **محولات قُدرة كبيرة (أكثر من 150MVA)**

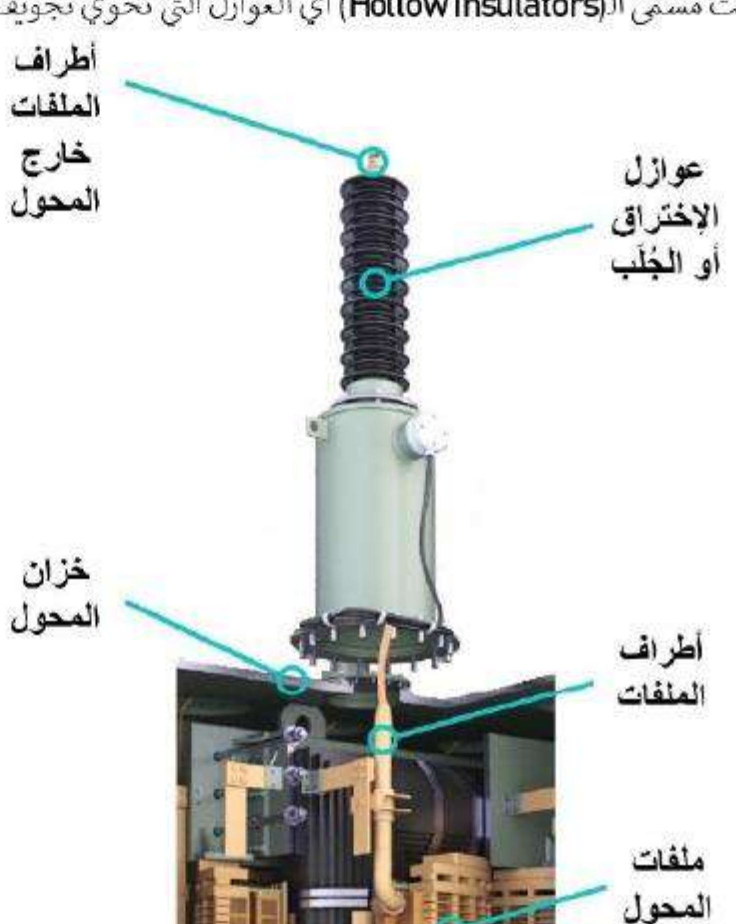
مع هذه المحولات إذا تم إستخدام طريقة التبريد (**ONAF**) فإننا سنحتاج إلى مبادلات حرارية – مشعّ - ذو حجم كبير، لذلك وللتقليل من حجم هذه المبادلات يتم إستخدام طرق التبريد (**OFAF** أو **ODAF**).

كما وتجدر الإشارة إلى أنه يُمكن الجمع بين أكثر من طريقة تبريد كما ذكر سابقاً، كمثال فإنه في المحولات الكبيرة عادة قد تكون طُرق التبريد كالتالي:

- عندما يكون حمل المحول أقل أو يساوي **60**% من الحمل الكامل تكون طريقة التبريد (**ONAN**).
- عندما يرتفع حمل المحول قرابة **60**% إلى **80**% من الحمل الكامل تكون طريقة التبريد (**ONAF**).
- عندما يرتفع حمل المحول أكثر من **80**% من الحمل الكامل تكون طريقة التبريد (**OFAF**).

5.7 عوازل الإختراق أو الجُلَب - Bushings

تندرج عوازل الإختراق (**Bushings**) تحت مُسمى الـ(**Hollow insulators**) أي العوازل التي تَحوي تجويف أو ممر للموصلات من خلالها، وتكمُن وظيفتها في تأمين العزل اللازم للموصلات في حال تطلب الأمر مرور هذه الموصلات خلال حاجز ما (إختراقه). وتُعد المحولات من أهم التطبيقات التي تُوظف عوازل الإختراق (**Bushings**) للقيام بالمهمة سابقة الذِكر، إذ يتطلب تصميم المحول أن يتم إخراج أطراف الملفات إلى خارج خزان المحول دون ملامسة الخزان الخاص بالمحول لغايات ربط المحول بمعدات الشبكة الكهربائية كما يظهر بالشكل (**1-77**).



الشكل رقم (**1-77**)

كما وتَجدُر الإشارة إلى أن ما مقداره قُرابة الـ(**60%**) بالمئة من عوازل الإختراق (**Bushings**) المُستخدمة عالمياً يتم توظيفها في المحولات الخارجية (**Outdoor**

transformers)، وما مِقداره (**20%**) بالمئة تُستخدم في مُجمعات القضبان المعزولة بالغاز (**Gas Insulated Switchgears - GIS**)، وما مِقداره (**10%**) بالمئة في المولدات (**Generators**)، وما مِقداره أقل من (**10%**) بالمئة تكون على الجدران (**Walls**) أو لغايات الفحص.

ويتم إختيار عوازل الإختراق (**Bushings**) وفقاً لمستوى الفولتية بالإضافة إلى مستوى التيار بشكل أساسي بالإضافة إلى البيئة التشغيلية المحيطة و أي إعتبارات أخرى مثل حجم محولات التيار المراد إستخدامها.

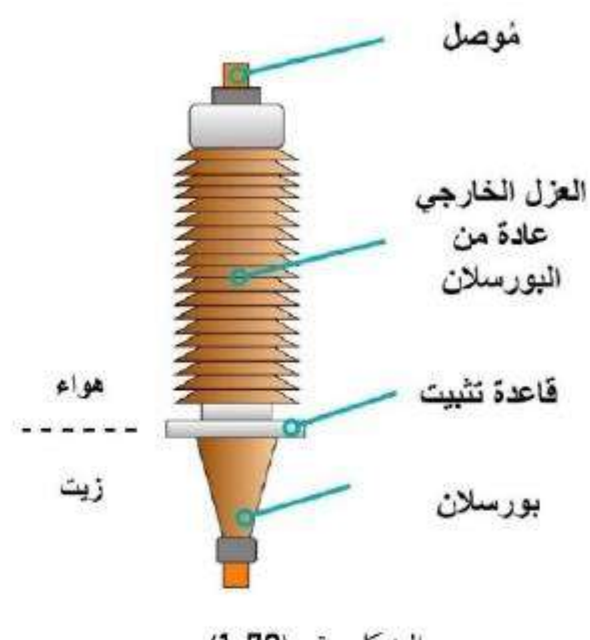
- **أنواع عوازل الإختراق / جُلَب المحولات**

يُمكن تصنيف عوازل الإختراق (**Bushings**) وفقاً لعدة أوجه منها ما هو حسب نوع الوسط العازل الخارجي عند طرفي عازل الإختراق ومنها ما هو تركيبي ومنها ما هو حسب نوع المادة العازلة داخل عازل الإختراق كالآتي:

  - **حسب نوع الوسط العازل الخارجي عند طرفي عازل الإختراق - Insulating Media on Ends**

يَعتمد هذا التصنيف على نوع التطبيق (**Application**) أو نوع المُعِدّة المُستخدم فيه عازل الإختراق، بحيث تُصنف وفقاً لنوع الوسط العازل الخارجي عند طرفيه إلى الآتي:

- **عوازل إختراق هواء – زيت (Air to Oil Bushings):** في هذا النوع يكون أحد طَرفي عازل الإختراق في الهواء و يَكون الطرف الآخَر مَغمور بالزيت كما هو الحال في المحولات المَغمورة بالزيت وغيرها من المُعدات المغمورة بالزيت كالقواطع و المُفاعلات الحثية (**Reactors**) والمُبين في الشكل (**78-1**).

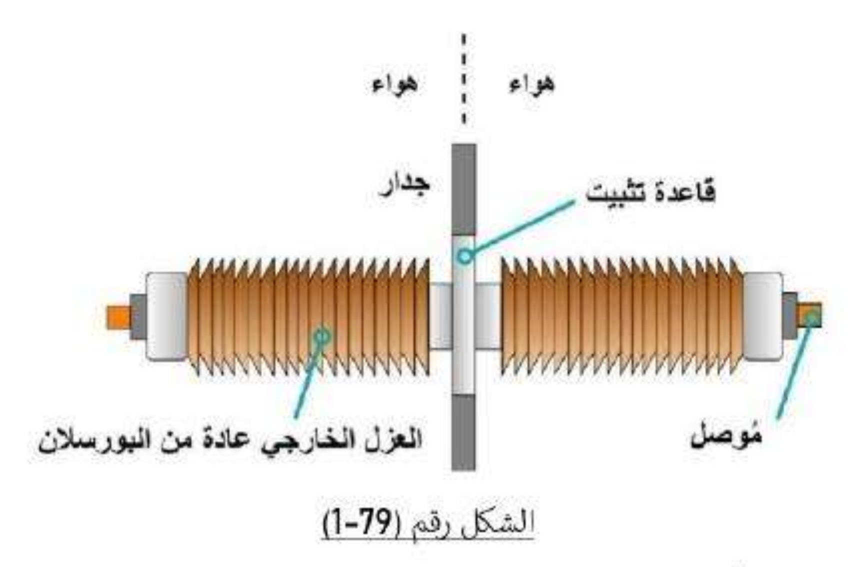


الشكل رقم (**78-1**)



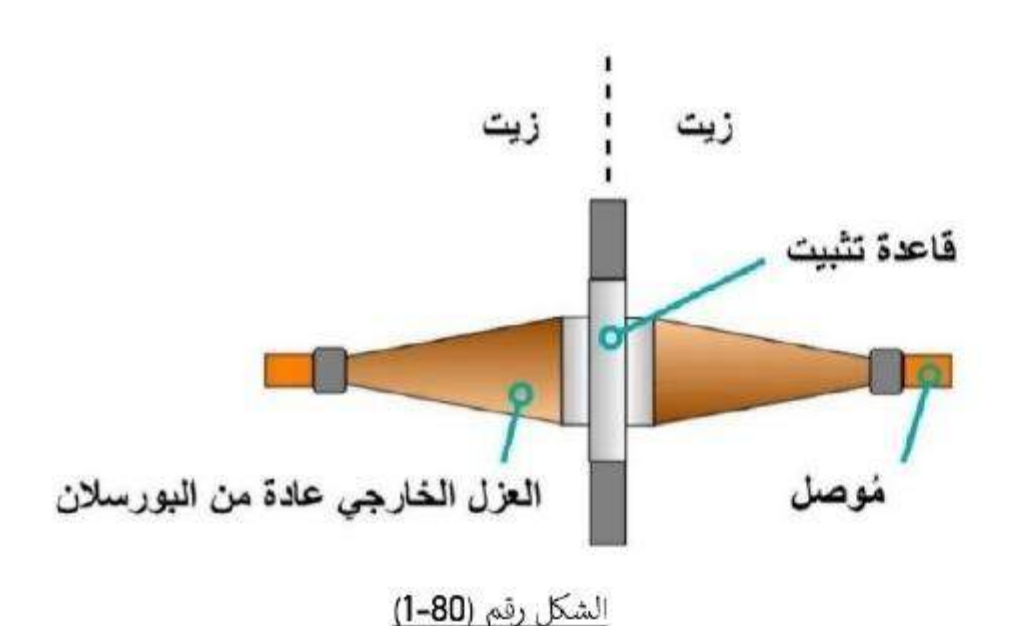
ملحوظة (1-12): كما يظهر بالشكل (**1-78**) أن طول عازل الإختراق الموجود بالزيت قُرابة نصف طول العازل الموجود بالهواء أو أقل، و يعود ذلك إلى أن قوة العزل (**Dielectric strength**) للزيت أكبر الضعف من نظيرتها للهواء الخارجي.

- **عوازل إختراق هواء – هواء (Air to Air Bushings):** في هذا النوع يَكون طَرفي عازل الإختراق في الهواء، وعادة ما يتم إستخدامه لتمرير موصل خارج المبنى بحيث يكون أحد أطراف عازل الإختراق في الهواء الداخلي للمبنى والآخر في الهواء الخارجي كما هو مبين في الشكل (**1-79**).



الشكل رقم (**1-79**)

- أنواع خاصة أُخرى من عوازل الإختراق ويندرج تحتها **(Air to SF6 bushings)** و **(Oil to SF6 bushings)** و **(Oil to Oil bushings)**.



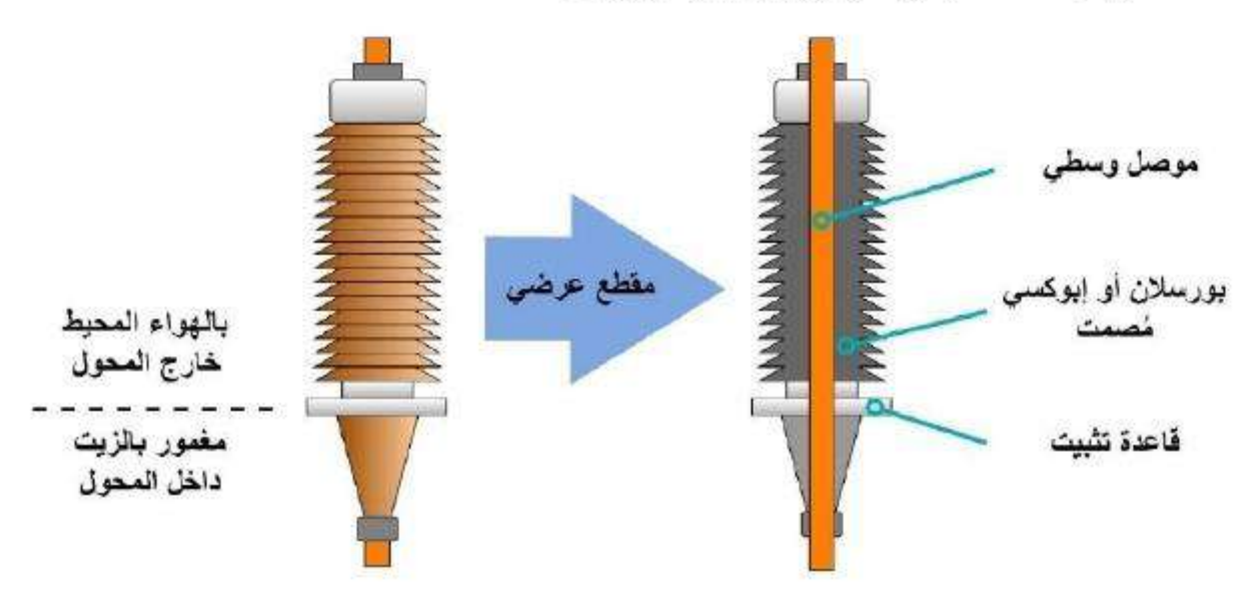
الشكل رقم (**1-80**)

○ حسب تركيب عازل الإختراق - Bushing Construction

تُصنف عوازل الإختراق (**Bushings**) وفقاً للتركيب إلى نوعين رئيسيين وهما:

- عوازل الإختراق الصلبة - Solid or Ungraded Bushings:

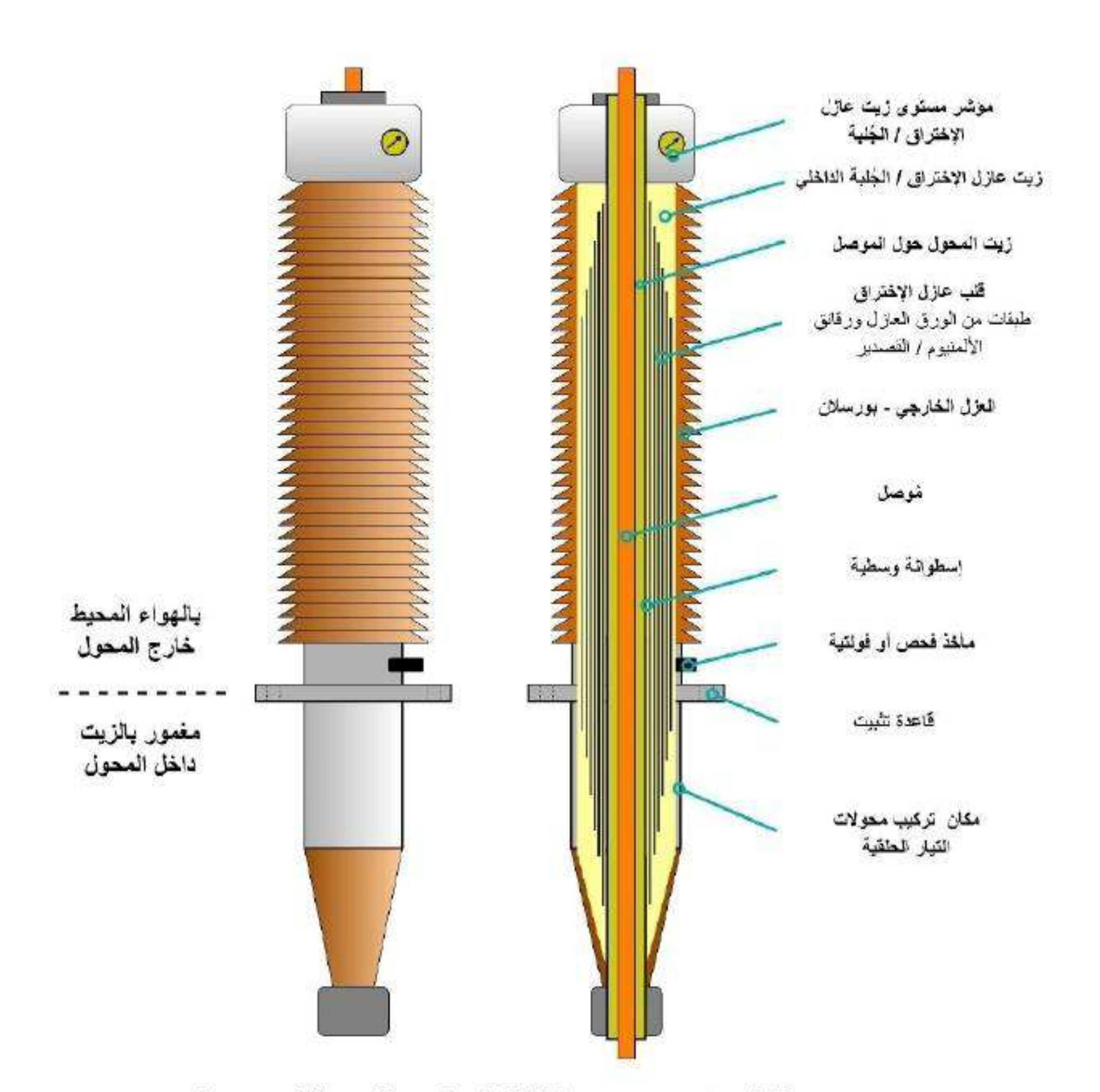
يُعد هذا النوع من أبسط الأنواع حيث أنه يتكون من عازل أجوف من البورسلان أو الإيبوكسي ويُمكن أن يتوسطه موصل كهربائي كجُزء من عازل الإختراق (**Bushing**) كما هو مبين في الشكل (**1-81**)، و يُمكن أن يكون العازل لوحده دون الموصل. ويُستخدم هذا النوع بشكل رئيسي للتطبيقات ذات الفولتية المنخفضة أي أقل من (**25 kV**) كيلوفولت.



الشكل رقم (1-81)

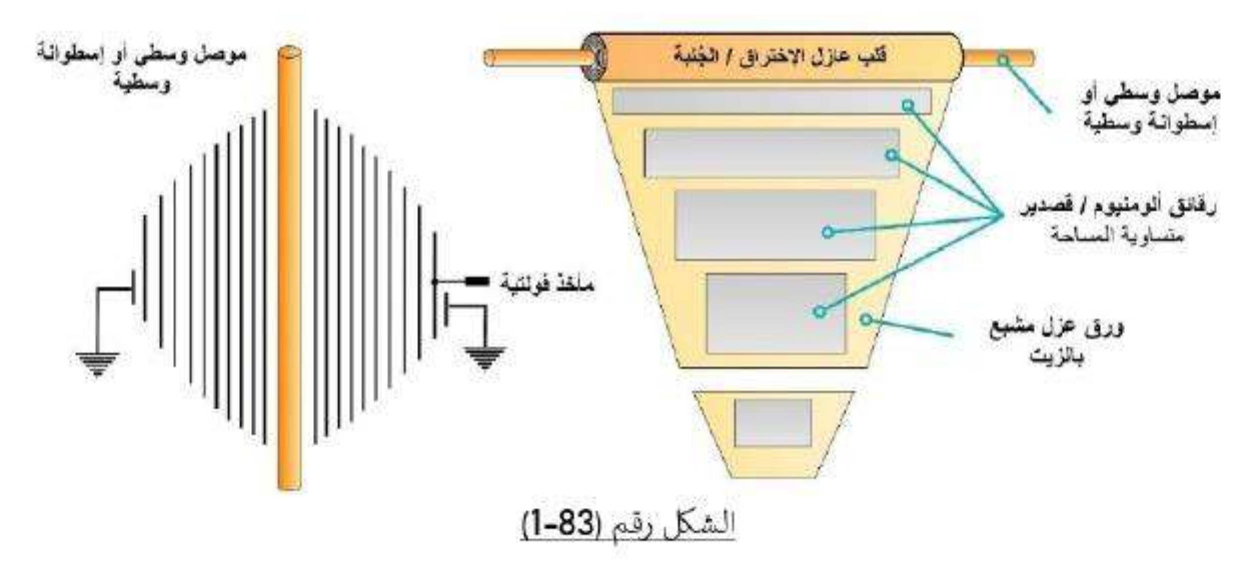
- عوازل الإختراق ذات العزل السَعوي المُتدرج - Capacitive Graded Bushing:

مع تطور النظام الكهربائي عبر الزمن وما صاحبه من إرتفاع في مستوى الفولتية كان لا بُد من إيجاد بديل للعوازل الإختراق الصلبة (**Solid/Ungraded Bushings**) سابقة الذكر و ذلك لعدم قدرتها على تحمل الفولتيات المرتفعة، وهذا بدوره أدى لظهور ما يُسمى بعوازل الإختراق ذات العزل السَعوي المُتدرج (**Capacitive Graded Bushings**) لما لهذا النوع من قدرة على توزيع المجال الكهربائي خارج عازل الإختراق بشكل أفضل من نظيرتها الصلبة التقليدية (**Solid / Ungraded**) خاصة للفولتيات الأكبر من (**25kV**) كيلوفولت.



الشكل رقم (1-82)

حيث يتكون هذا النوع من عوازل الإختراق (**Bushings**) من موصل وسطي (**Central conductor**) أو إسطوانة وسطية (**Central Tube**) يتم لفها من الخارج بورق عزل مُشبع بالزيت (**Oil Impregnated Paper - OIP**) كما هو مبين بالشكل (**1-82**) أو مُشبع بالراتنج أو الصمغ (**Resin Impregnated Paper - RIP**) كما هو مبين بالشكل (**1-88**)، بحيث يكون الوجه الداخلي لورق العزل عبارة عن رقائق الألمنيوم أو ما يُسمى بالقصدير (**Aluminum foil**) كما هو موضح بالشكل (**1-83**)، مما يؤدي لتكوّن مجموعة من المواسعات الموصولة على التوالي والتي من شأنها التحكم وتوزيع المجال الكهربائي المحوري (**Axial Electrical Field**) و الشعاعي/القُطري (**Radial Electrical Field**).



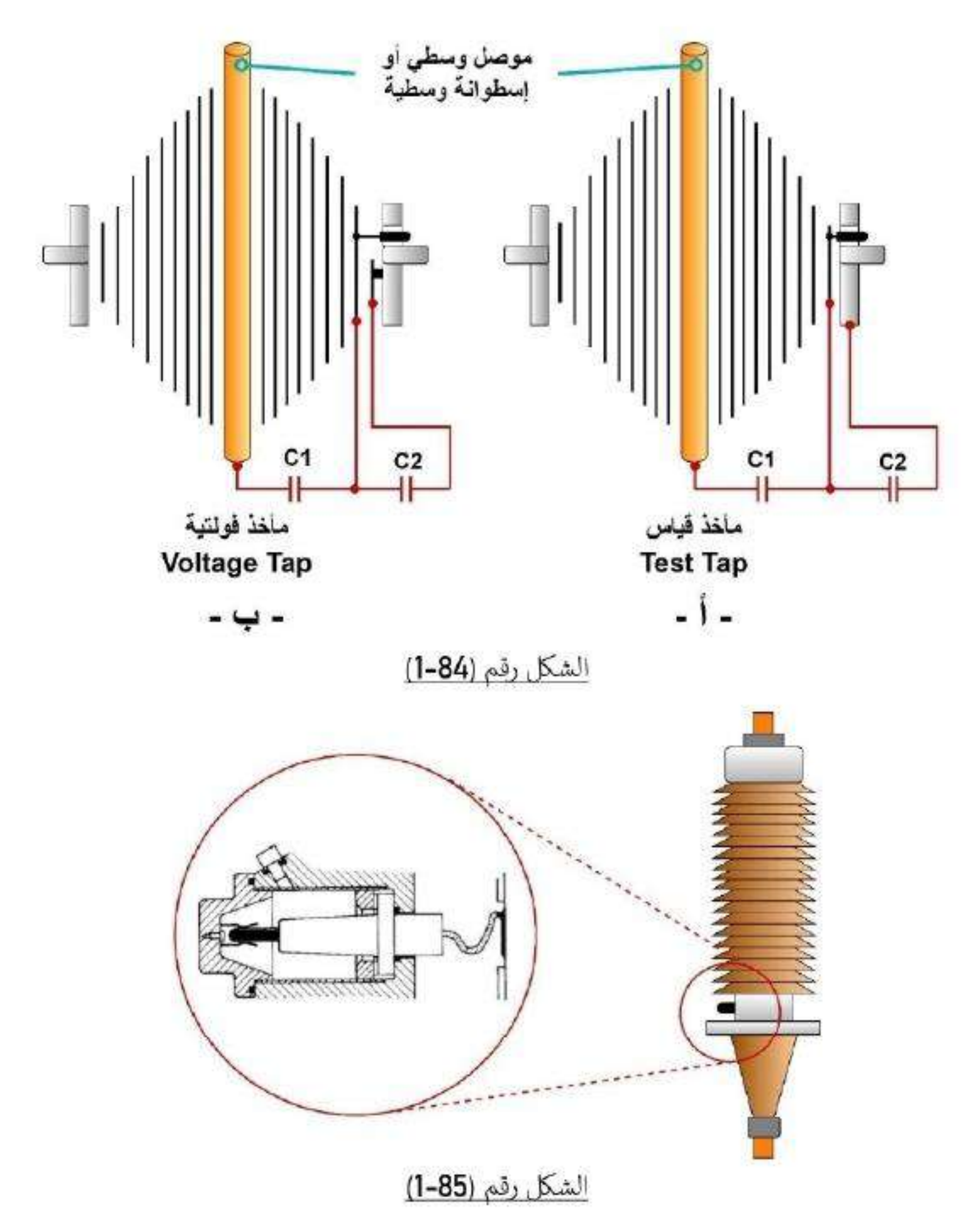
الشكل رقم (1-83)

و يتميز هذا النوع بوجود نوعان من المآخذ (**Taps**) موجودة عند قاعدة تثبيت عازل الإختراق (**Mounting flange**) من الخارج، **النوع الأول** وهو مأخذ الفحص (**Test Tap**) ويكون مُخصص لإجراء الفحوصات على عازل الإختراق (**Bushing**) كفحوصات معامل التبدد و القدرة (**DF & PF**) و فحص المواسعة (**C**) وفحص التفريغ الجزئي (**PD**)، حيث يتكون هذا المأخذ من غطاء مسنن (**Threaded cover**) يكون تحته مسمار (**Pin**) متصل بأخر طبقة ألامنيوم/قصدير (**Aluminum foil**) داخل عازل الإختراق (**Bushing**)، بحيث يُشار إلى قيمة المواسعة بين المسمار (**Pin**) الخاص بهذا المأخذ (**Test tap**) و الموصل الوسطي (**Central Conductor**) أو الإسطوانة الوسطية (**Central Tube**) بالمواسعة رقم واحد (**C1**)، ويُشار إلى قيمة المواسعة بين المسمار (**Pin**) الخاص بهذا المأخذ (**Test tap**) و قاعدة التثبيت (**Mounting flange**) أو الأرضي بالمواسعة رقم إثنان (**C2**) كما هو مُبين في الشكل [(**1-84**) (أ)]، وتكون قيمة هاتيين المواسعتين مثبتة على لوحة البيانات (**Name plate**) الخاصة بعازل الإختراق لغايات المقارنة عند الفحص.

و تكون وظيفة غطاء المأخذ المُسنن (**Threaded cover**) سابق الذِكر هو تأمين التأريض اللازم لآخر طبقة ألامنيوم/قصدير (**Aluminum foil**) في حال كان عازل الإختراق (**Bushing**) في الخدمة أي أنه تحت تأثير الفولتية، أما في حال كان عازل الإختراق (**Bushing**) خارج الخدمة أي أنه مفصول عن مصدر الفولتية و لغايات الفحص يتم إزالة هذا الغطاء ليُصبح المسمار (**Pin**) غير مؤرض، وتتم عملية الفحص لإستخراج قيمة المواسعة (**C1**) و التي تُعطي إنطباع عن حالة عازل الإختراق (**Bushing**) الداخلية.

أما فيما يَخص **النوع الثاني** من المآخذ وهو مأخذ الفولتية (**Voltage/Potential Tap**) المبين في الشكل [(**1-84**) (ب)] فإنه عادة ما يتم إستخدامه لعوازل الإختراق (**Bushings**) ذات الفولتيات المرتفعة (أكبر من **69** كيلوفولت) و تكمن وظيفته في تأمين مأخذ فحص كما هو الحال في المآخذ سابق الذِكر (**Test Tap**) بالإضافة إلى تأمين مصدر فولتية للمعدات المساعدة إن وجدت.

كما وتجدُر الإشارة إلى أن المواسعة (**C1**) عادةً ما تكون متقاربة بالقيمة مع المواسعة (**C2**) لمآخذ الفحص (**Test Tap**)، أما فيما يخُص مآخذ الفولتية (**Voltage/Potential Tap**) فإن قيمة المواسعة (**C1**) تكون أقل بكثير من المواسعة (**C2**).



الشكل رقم (1-84)

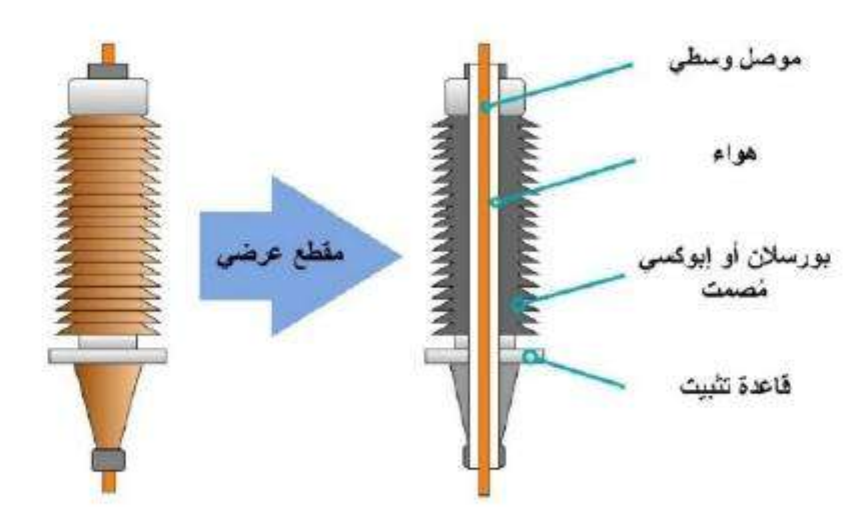
الشكل رقم (1-85)

- **حسب نوع المادة العازلة داخل عازل الإختراق - Bushing inside insulation**

تُصنف عوازل الإختراق (**Bushings**) وفقاً لنوع المادة العازلة إلى الأنواع التالية:

- **عوازل الإختراق المعزولة بالهواء – Air Insulated Bushings**

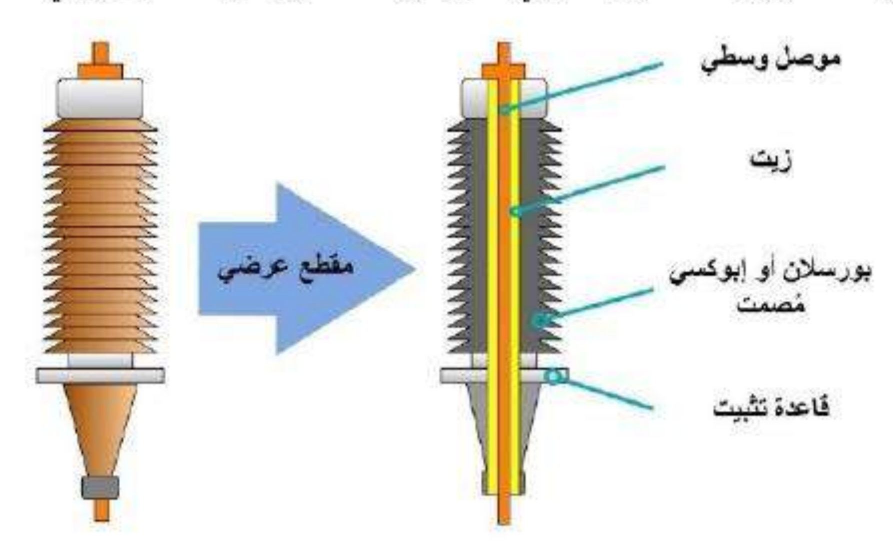
وهي إحدى أنواع عوازل الإختراق الصلبة (**Solid/Ungraded Bushings**) حيث يكون الهواء هو الوسط العازل الداخلي بين الموصل (**Conductor**) والعازل الخارجي، وعادة ما يكون هذا العزل الخارجي مُكون من مادة البورسلان كما هو مبين في الشكل (**1-86**).



الشكل رقم (1-86)

- عوازل الإختراق المعزولة بالزيت أو المملوءة بالزيت - **Oil Insulated or Oil Filled Bushings**

وهي إحدى أنواع عوازل الإختراق الصلبة (**Solid/Ungraded Bushings**) حيث يكون الزيت المعدني هو الوسط العازل الداخلي بين الموصل (**Conductor**) و العازل الخارجي، وعادة ما يكون هذا العزل الخارجي مُكوَّن من مادة البورسلان كما هو مبين في الشكل (**1-87**).



الشكل رقم (1-87)

- عوازل الإختراق ذات العزل المُتدرّج المُشبع بالزيت – **Oil Impregnated Paper Bushings OIP**

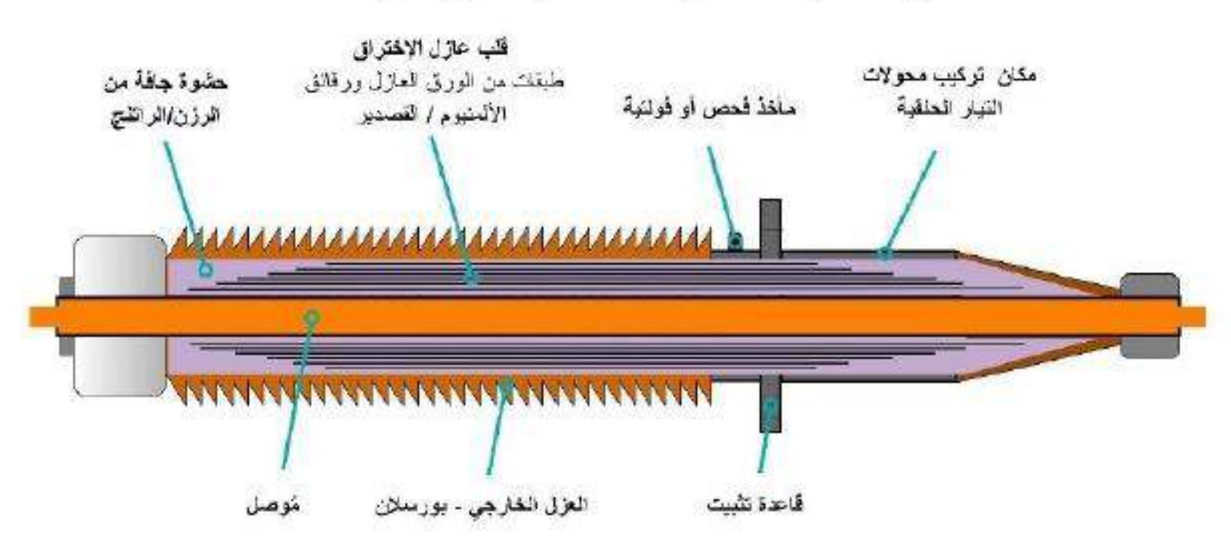
وهي إحدى أنواع عوازل الإختراق ذات العزل المُتدرّج (**Graded Bushings**) حيث يكون ورق العزل الموجود داخله مُشبع بالزيت، ويتم ملء الفراغ بين العزل الداخلي (**OIP**) أو ما يُسمى بقلب عازل الإختراق والعزل الخارجي لعازل الإختراق والمُكوَّن عادة من البورسلان بالزيت المعدني كما هو موضح في الشكل (**1-82**). ويُعد هذا النوع من أكثر الأنواع إنتشاراً في محولات القدرة ذات الفولتية المرتفعة.

ومن مميزات هذا النوع هو سعره المنخفض نسبياً و إمكانية فحص الزيت الخاص به للكشف عن حالة عازل الإختراق، و من سيئاته هو إمكانية الإنفجار والتسبب بحريق للمحول وكذلك إمكانية حدوث تسريب للزيت بالإضافة إلى الحاجة للتخزين بوضعية مُعيّنة (بشكل عامودي أو مائل بزاوية معينة).

- **عوازل إختراق ذات العزل المُتدرّج المُشبع بالراتنج/الصمغ – Resin Impregnated Paper Bushings RIP**

وهي إحدى أنواع عوازل الإختراق ذات العزل المُتدرّج (**Graded Bushings**) حيث يكون ورق العزل الموجود داخله مُشبع بالراتنج أو الصمغ (**Resin**)، ويتم ملئ الفراغ بين العزل الداخلي (**RIP**) أو ما يُسمى بقلب عازل الإختراق والعزل الخارجي لعازل الإختراق والمُكوَّن عادة من البورسلان بمادة عزل جافة أو غيرها من المواد العازلة كما هو موضح في الشكل (**1-88**).

ومن مميزات هذا النوع أنه ذو قلب (**RIP**) غير قابل للإشتعال على العكس من النوع (**OIP**) سابق الذِكر، وكذلك ذو مستوى تفريغ جزئي (**Partial discharge**) منخفض مما يتيح إستخدامه في التطبيقات ذات الفولتية المرتفعة، و من سيئاته سعره المرتفع نسبياً.



Capacitive Graded Resin Impregnated Paper (RIP) Bushing

الشكل رقم (**1-88**)

- **عوازل الإختراق ذات القلب المُكون من طبقات من الورق والرتنج - Resin Bonded Bushings RBP**

حيث يتكون هذا النوع من عوازل الإختراق (**Bushings**) من موصل وسطي (**Central conductor**) أو إسطوانة وسطية (**Central Tube**) يتم لفها من الخارج بورق عزل بحيث يكون الوجه الداخلي لورق العزل مُغطى بطبقة رقيقة من الراتنج (**Epoxy resin**) ويتخللها مادة شبه موصلة مثل الغرافيت (**Graphite**) أو الكربون (**Carbon**) بهدف عمل تدريج للمجال الكهربائي الناتج عن الموصل الوسطي، ويتم ملئ الفراغ بين العزل الداخلي (**RBP**) أو ما يُسمى بقلب عازل

الإختراق والعزل الخارجي لعازل الإختراق والمُكوّن عادة من البورسلان من الزيت أو الفوم (**Foam**).
و تَجدُر الإشارة إلى أن هذا النوع تم التوقف عن تصنيعه حالياً.

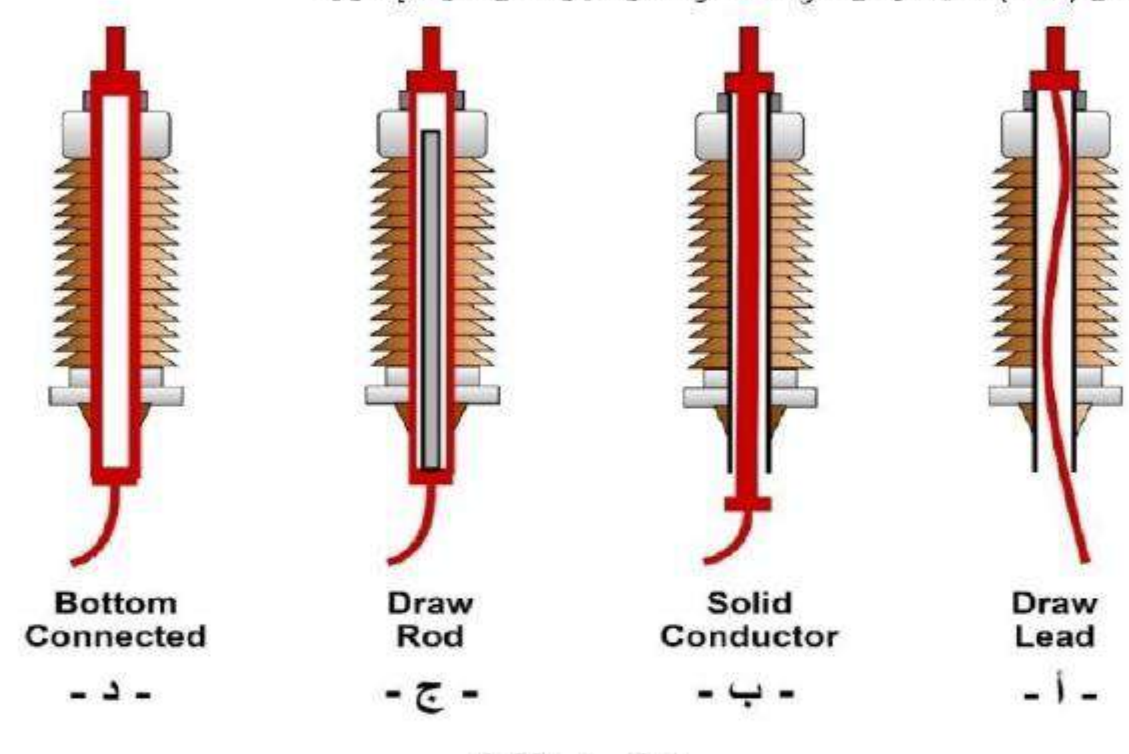
ومن مميزات هذا النوع هو أنه ذو قلب (**RBP**) غير قابل للإشتعال على العكس من النوع (**OIP**) و ذو سعر منخفض نسبياً، و من سيئاته أنه ذو مستوى تفريغ جزئي (**Partial discharge**) مرتفع نوعاً ما مما لا يُتيح إستخدامه في التطبيقات ذات الفولتية المرتفعة الأكثر من (**400 kV**) كيلوفولت وكذلك إمكانية دخول الماء للقلب في حال التخزين الخاطئ.

- **عوازل الإختراق المعزولة بالغاز – Gas Insulated Bushings**

في هذا النوع من عوازل الإختراق يكون الغاز المضغوط – عادة غاز سداسي فلوريد الكبريت SF_6 - هو الوسط العازل بين الموصل الوسطي (**Central conductor**) و العزل الخارجي والمُكوّن عادة من البورسلان أو المطاط.

• أنواع توصيلات عوازل إختراق المحولات

هنالك أربعة أنواع رئيسية للتوصيلات الخاصة بعوازل إختراق المحولات (**Bushings**) كما هو مبين بالشكل (**1-89**)، حيث يُمثل اللون الأحمر مسار التيار داخل عازل الإختراق.



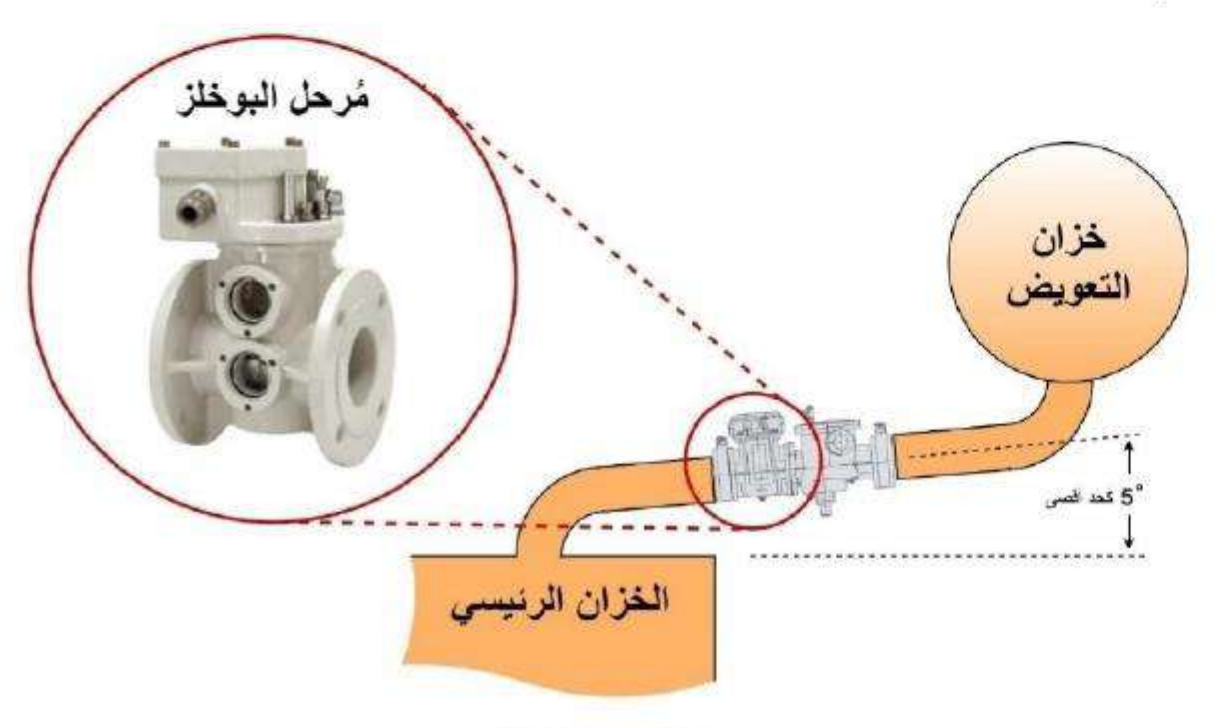
الشكل رقم (1-89)

5.8 مُعدات المُراقبة والحماية الفيزيائية المساعدة – Monitoring and Physical Protection Accessories

هنالك العديد من المُعدات المساعدة التي يتم تركيبها على المحول بهدف المراقبة بالإضافة إلى تأمين الحماية اللازمة في حال حدوث أعطال وهي كالآتي:

- **مُرحّل البُوخلز – Buchholz relay**

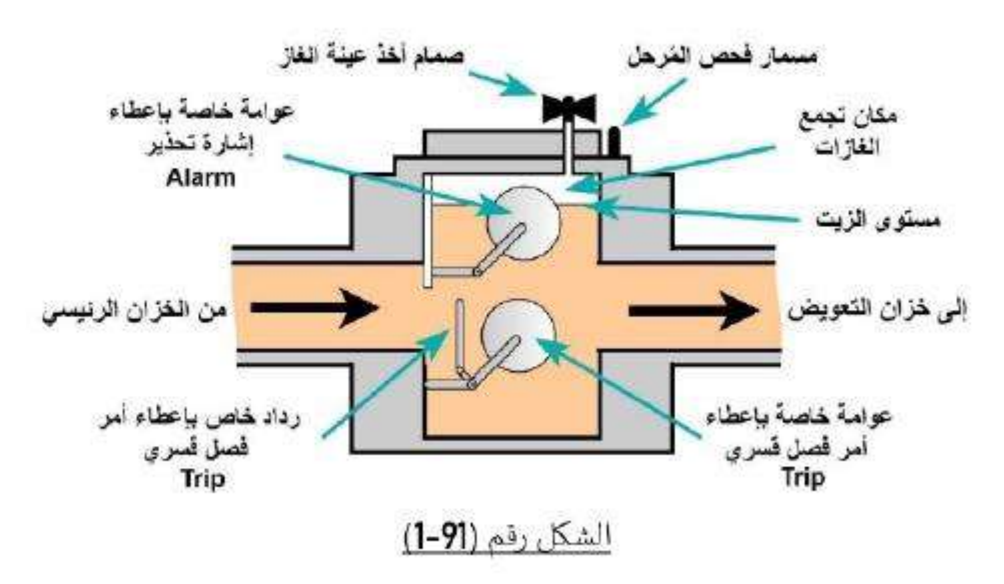
عادة ما يتم إستخدامه للمحولات ذات السِعة الأكبر من (**500kVA**) كيلو فولت أمبير لأسباب إقتصادية، ويتم تركيب هذا المرحل على أنبوب الزيت الرئيسي الواصل بين خزان التعويض (**Conservator tank**) والخزان الرئيسي للمحول (**Main tank**) أو حجرة مُغيّر الخطوة من نوع (**OLTC**) كما هو مبين بالشكل (**1-90**).



الشكل رقم (1-90)

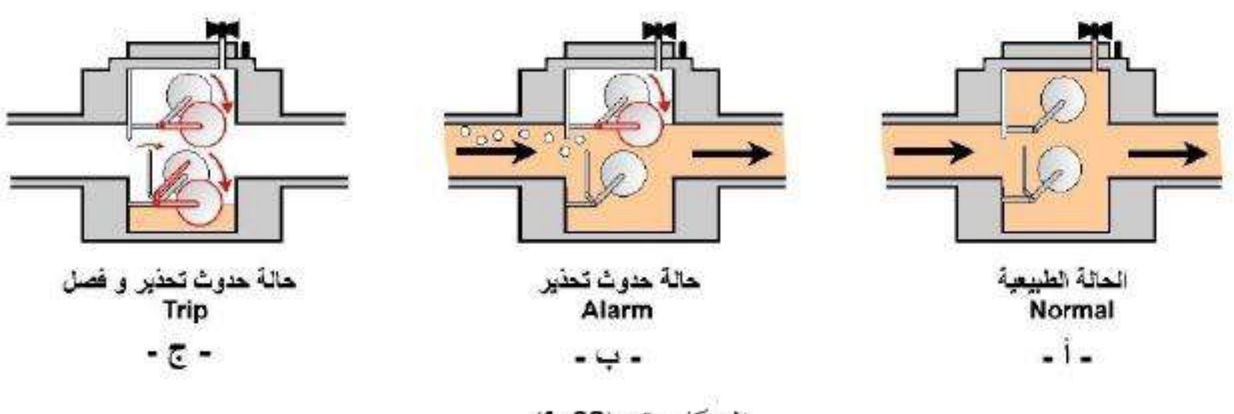
كما هو معلوم أن أغلب الأعطال الداخلية في المحول تؤدي لظهور نقاط إحماء في الملفات أو القلب الحديدي ونتيجة لهذا الإحماء سوف تنتج مجموعة من الغازات والتي سوف تصعد لأعلى نقطة في المحول وهو خزان التعويض (**Conservator tank**) مروراً بمُرحّل البوخلز، وهنا تَكمُن وظيفة مُرحّل البوخلز وهي بتجميع هذه الغازات في حُجرة أعلى المرحل كما يظهر بالشكل (**1-91**)، مما يؤدي إلى إنخفاض مستوى الزيت ونزول العوامة (**Float**) العُلوية مُصدرةً إشارة تحذير (**Alarm**) لا تؤدي إلى فصل المحول، ويُقدّر حجم هذه الحجرة من (**100ml – 300ml**) مليلتر.

أما فيما يَخُص العوامة السفلية فإنها تعمل في حالة إنخفاض مستوى زيت المحول نتيجة لوجود تسريب زيت مما يؤدي لنزول العوامة العُلوية مصدرةً إشارة تحذير (**Alarm**) ومن ثم العوامة السُفلية مُصدرةً أمر فصل قَسري للمحول (**Trip**).



الشكل رقم (1-91)

وفي حال حدوث عطل كبير (خَطِر) داخل المحول أدى لإرتفاع الضغط فإن الزيت الموجود في الخزان الرئيسي سوف يبدأ بالحركة السريعة بإتجاه خزان التعويض (**Conservator tank**) مروراً بمُرحّل البوخلز مؤدياً إلى تحريك الرداد المُثبت على العوامة السُفلية وإصدار أمر فصل قَسري للمحول (**Trip**) وهذا ما يُسمى بالـ(**Oil surge**)، حيث أن هذا الرداد يتحرك في حال كانت سرعة تدفق الزيت إلى خزان التعويض من (**1m/s – 3m/s**) متر/ثانية أو أكبر من ذلك.



الشكل رقم (1-92)

الشكل [(1-92) (ب)] يوضح حركة العوامة العُلوية لمُرحل البوخلز في حال تجمع الغازات مما يؤدي لإصدار إشارة تحذير (**Alarm**) فقط، و الشكل [(1-92) (ج)] يوضح حركة العوامة العُلوية والسُفلية في حال حدوث تسريب للزيت من الخزان الرئيسي ونزول مستوى الزيت مما يؤدي لإصدار إشارة تحذير (**Alarm**) و أمر فصل قَسري (**Trip**) للمحول.

في حال تَفعّل مُرحل البوخلز وإصدار لإشارة التحذير (**Alarm**) يُمكن أخذ عينة من الغازات المُتجمعة في المُرحل بواسطة الصمام المبين في الشكل (**1-91**) وتحليل هذه الغازات لمعرفة التركيب الكيميائي ومنه يتم

معرفة نوع العطل الداخلي في المحول، كما ويُمكن فحص عينة الغاز بطُرق بسيطة كالنظر و الشم و الحرق المباشر وفقاً للجدول (**10-1**) الآتي كما ورد في كتاب [المحولات الكهربائية، الجزء الأول، الدكتورة كاميليا محمد].

<u>الجدول رقم (**10-1**)</u>

حالة الغازات	مصدر العطل
عديم اللون والرائحة وغير قابل للإشتعال	وجود هواء داخل المحول – أقل خطراً وقد يكون السبب تسرب بعض الهواء للمحول أثناء معالجة الزيت
عديم اللون والرائحة وقابل للإشتعال	عطل داخل المحول
أبيض او رمادي	ورق العزل
أصفر	أجزاء خشبية
أسود	زيت



ملحوظة (13-1): يتم تصميم الأنبوب الحامل لمُرحل البوخلز بشكل أفقي مع وجود ميلان بزاوية صغيرة (**1° إلى 5°**) درجات عن الخط الأفقي وذلك لمساعدة فقاعات الغاز على الإنتقال من الخزان الرئيسي والوصول لمُرحّل البوخلز وعدم تكوّن جيوب غازية في الأنبوب مما يَحول دون وصول هذه الغازات إلى مُرحّل البوخلز.

- ## صمام الإغلاق الذاتي - Auto-shutoff Valve

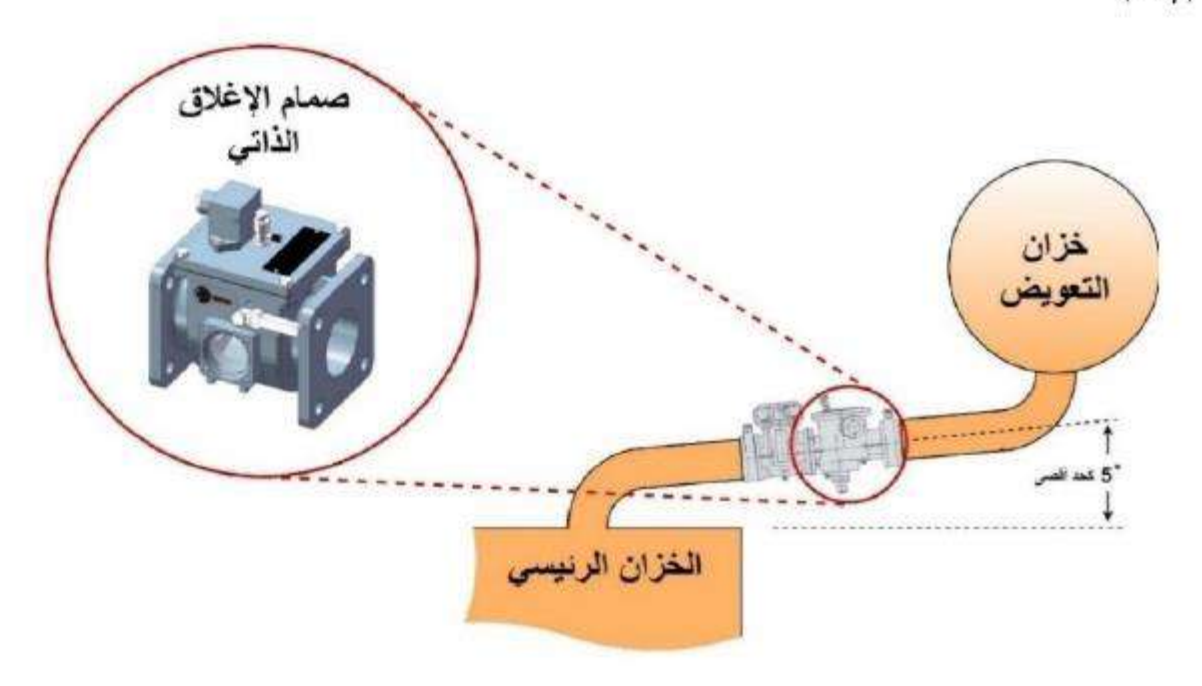
في وضع التشغيل الطبيعي للمحول يكون إتجاه تدفق الزيت بين خزان التعويض (**Conservator**) والخزان الرئيسي (**Main tank**) بالإتجاهين نتيجة لتمدد وتقلص الزيت مع الحرارة، ففي حالة تقلص حجم الزيت نتيجة لإنخفاض حمل المحول أو إنخفاض درجة حرارة البيئة المحيطة يتدفق الزيت من خزان التعويض بإتجاه الخزان الرئيسي، أما في حال إزدياد حجم الزيت نتيجة لزيادة حمل المحول أو إزدياد درجة حرارة البيئة المحيطة يتدفق الزيت من الخزان الرئيسي بإتجاه خزان التعويض، وتكون سرعة التدفق في الأوضاع الطبيعية سابقة الذكر منخفضة نسبياً.

أما في الأوضاع غير الطبيعية فهنالك إحتمالين:

الإحتمال الأول: حدوث عطل داخلي أدى لإرتفاع الضغط داخل الخزان الرئيسي و تدفق الزيت بسرعة من الخزان الرئيسي بإتجاه خزان التعويض، و في هذه الحالة يتولى مُرحّل البوخلز مهمة حماية المحول و إصدار أمر الفصل القسري للمحول (**Trip**) كما تم شرحه مسبقاً.

الإحتمال الثاني: حدوث تسريب زيت كبير من الخزان الرئيسي أدى لتدفق الزيت بشكل سريع من خزان التعويض بإتجاه الخزان الرئيسي، وفي هذه الحالة يتولى صمام الإغلاق الذاتي (**Auto-shutoff Valve**)

أو ما يُسمى بالـ(**Shutter Valve**) مهمة حماية المحول و ذلك بالإغلاق و إصدار أمر فصل قسري للمحول (**Trip**).



الشكل رقم (1-93)

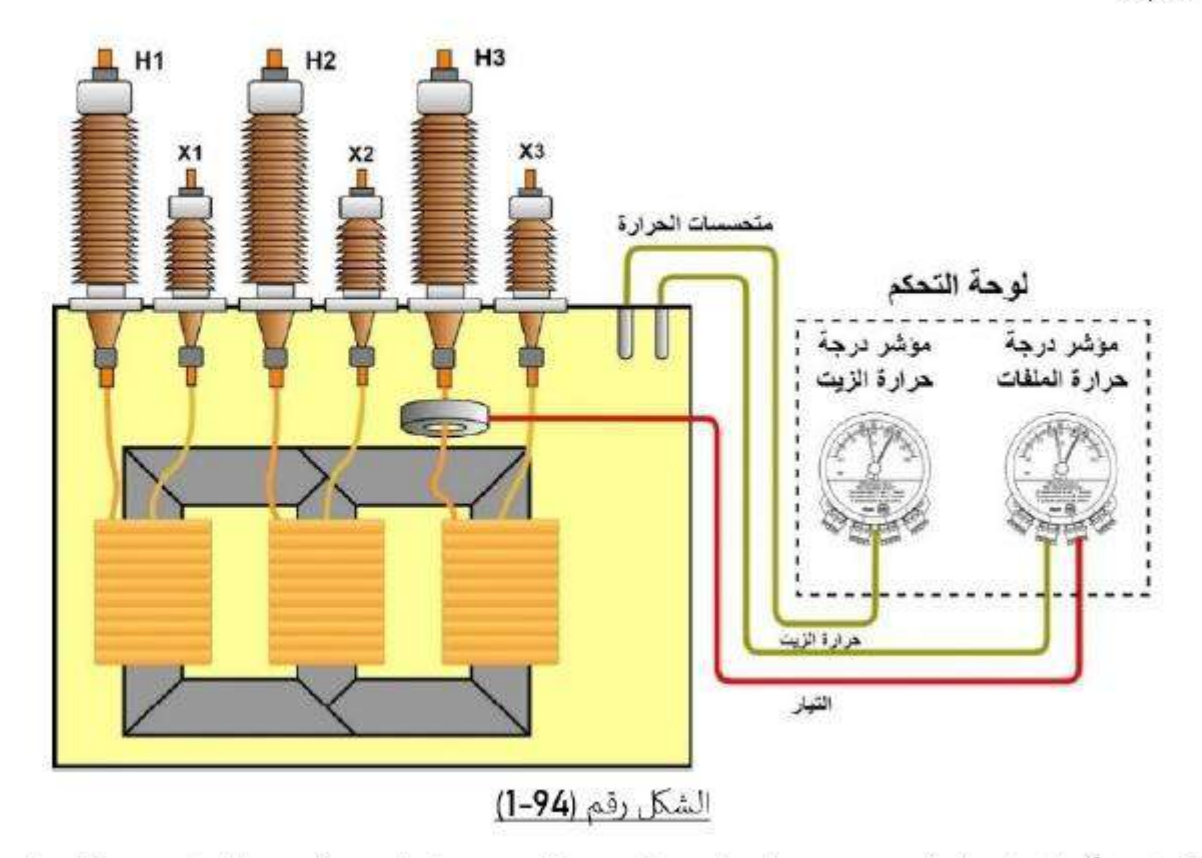
عادة ما يتم تركيب صمام الإغلاق الذاتي على الأنبوب الرئيسي الواصل بين خزان التعويض والخزان الرئيسي إلى جانب مرحل البوخلز كما هو مبين في الشكل (**1-93**)، ويتكون هذا الصمام من حجرتين للزيت وعندما يتحسس حدوث فرق في الضغط بين الحجرتين نتيجة لسرعة تدفق الزيت بإتجاه الخزان الرئيسي يقوم بالإغلاق و إصدار أمر الفصل القَسري للمحول (**Trip**) كما ذكر سابقاً. حيث أن العوامة (**Float**) الخاصة بهذا الصمام تتحرك في حال كانت سرعة تدفق الزيت أكبر من ($30\ dm^3/min$) ديسي متر مكعب / دقيقة.

ويَكمُن الهدف الرئيسي من إغلاق الصمام أنه في حال وجود تسريب زيت كبير من الخزان الرئيسي قد يؤدي إلى إستنزاف كامل كمية الزيت من خزان التعويض مما يعني وصول الهواء إلى الخزان الداخلي مما يزيد إحتمالية حدوث قوس كهربائي ولذلك فإن إغلاق الصمام و فصل المحول تُعد أكثر الحلول نجاعة في هذه الحالة.

- **مؤشر حرارة الزيت – Oil Temperature Indicator OTI**

كما ذكر سابقاً فإن أغلب الأعطال الداخلية للمحول عادة ما تُنتج حرارة لذلك يتم تركيب هذا المؤشر لمراقبة حرارة الزيت أثناء عمل المحول، وتتكون هذه المُعدّة من حساس حرارة لتحسس حرارة الزيت بشكل مباشر ويتم تركيبه في أعلى نقطة من الخزان الرئيسي للمحول ويكون موصول بمؤشر درجة الحرارة الموجود في لوحة التحكم المُثبتة على جدار خزان المحول من الخارج عبر أنابيب شعرية (**Capillary tubes**) كما هو مبين في الشكل (**1-94**). و إلى جانب قياس درجة حرارة الزيت وعرضها عبر المؤشر فإن لهذا الجهاز وظائف أخرى كالتحكم في عمل مراوح التبريد في حال إرتفاع الحرارة بالإضافة إلى إصدار إشارة

تحذير (**Alarm**) و أمر فصل قسري للمحول (**Trip**) في حال تجاوزت حرارة الزيت حدود مُعينة مضبوطة مسبقاً.



الشكل رقم (**1-94**)

كما وتجدُر الإشارة إلى أنه في بعض التصاميم يكون هنالك مؤشران للزيت أحدهما لقياس درجة حرارة الزيت العُلوي ويُسمى (**Top Oil Temperature Indicator**) والآخر لقياس درجة حرارة الزيت السُفلي و يُسمى (**Bottom Oil Temperature Indicator**).

وفي التصاميم الحديثة للمحولات عادة ما يكون هنالك مؤشرين لدرجة حرارة للزيت، أحدهما للتحكم بمراوح التبريد والأخر للحماية من إرتفاع درجة الحرارة وإصدار إشارة التحذير (**Alarm**) وأمر الفصل القسري للمحول (**Trip**) وذلك لزيادة الموثوقية حيث تدور فلسفة هذا التصميم في الفصل بين أجهزة التحكم وأجهزة الحماية.

- **مؤشر حرارة الملفات – Winding Temperature Indicator WTI**

على النظير من مؤشر حرارة الزيت (**OTI**) هنالك مؤشر لقياس درجة حرارة الملفات أيضاً له نفس الوظيفة في بعض الأحيان من قياس للحرارة و التحكم بمراوح التبريد ومضخة الزيت بالإضافة إلى إصدار إشارة تحذير (**Alarm**) وأمر فصل قسري للمحول (**Trip**) في حال تجاوزت حرارة الملفات حدود مُعينة مضبوطة مسبقاً. و نظراً لتعقيد تركيب الملفات ونظام عزلها سابق الذكر بالإضافة لتسهيل عملية الصيانة فإنه من غير المُمكن وضع حساس الحرارة الخاص بهذا المؤشر داخل الملفات، لذلك يتم اللجوء إلى طريقة غير مباشرة (**Thermal Imaging**) لمعرفة درجة حرارة الملفات عن طريق إشتقاقها من درجة حرارة الزيت و مقدار التيار المار في الملفات كما هو موضح بالشكل (**1-94**).



الشكل رقم (95-1)

الشكل (95-1) يبين الأجزاء الرئيسية لمؤشر الحرارة مع قيم درجات الحرارة الخاصة بالتحكم بالمراوح وإصدار إشارة التحذير (**Alarm**) و الفصل القسري للمحول (**Trip**). وكمثال يتم ضبط درجات الحرارة الخاصة بالمؤشر كالآتي: عند **60°** درجة مئوية يتم إصدار أمر تشغيل المراوح وعند **75°** درجة مئوية يتم إصدار أمر تشغيل لمضخة الزيت إن وُجدت و عند **110°** درجة مئوية يتم إصدار إشارة تحذير (**Alarm**) و عند **120°** درجة مئوية يتم إصدار أمر فصل قسري للمحول (**Trip**).

كما وتَجدُر الإشارة إلى أنه في بعض التصاميم يتم إعتماد مؤشرين لدرجة حرارة الملفات، أحدهما لملفات الفولتية المرتفعة ويُسمى (**HV Winding Temperature Indication**) والآخَر لملفات الفولتية المنخفضة و يُسمى (**LV Winding Temperature Indicator**).



ملحوظة (14-1): من الشكل (95-1) يُمكن ملاحظة وجود مؤشر باللون الأحمر وظيفته تحديد أعلى قيمة درجة حرارة وصل إليها الزيت أو الملفات ويبقى عندها، ففي حال إرتفعت درجة الحرارة لحدود معينة ثم انخفضت بعد ذلك فإن هذا المؤشر يبقى عند وضعيته ولا ينخفض بإنخفاض المؤشر الرئيسي وعند عمليات الصيانة يتم عمل إرساء (**Reset**) لهذا المؤشر يدوياً بجعله ملاصق للمؤشر الرئيسي.

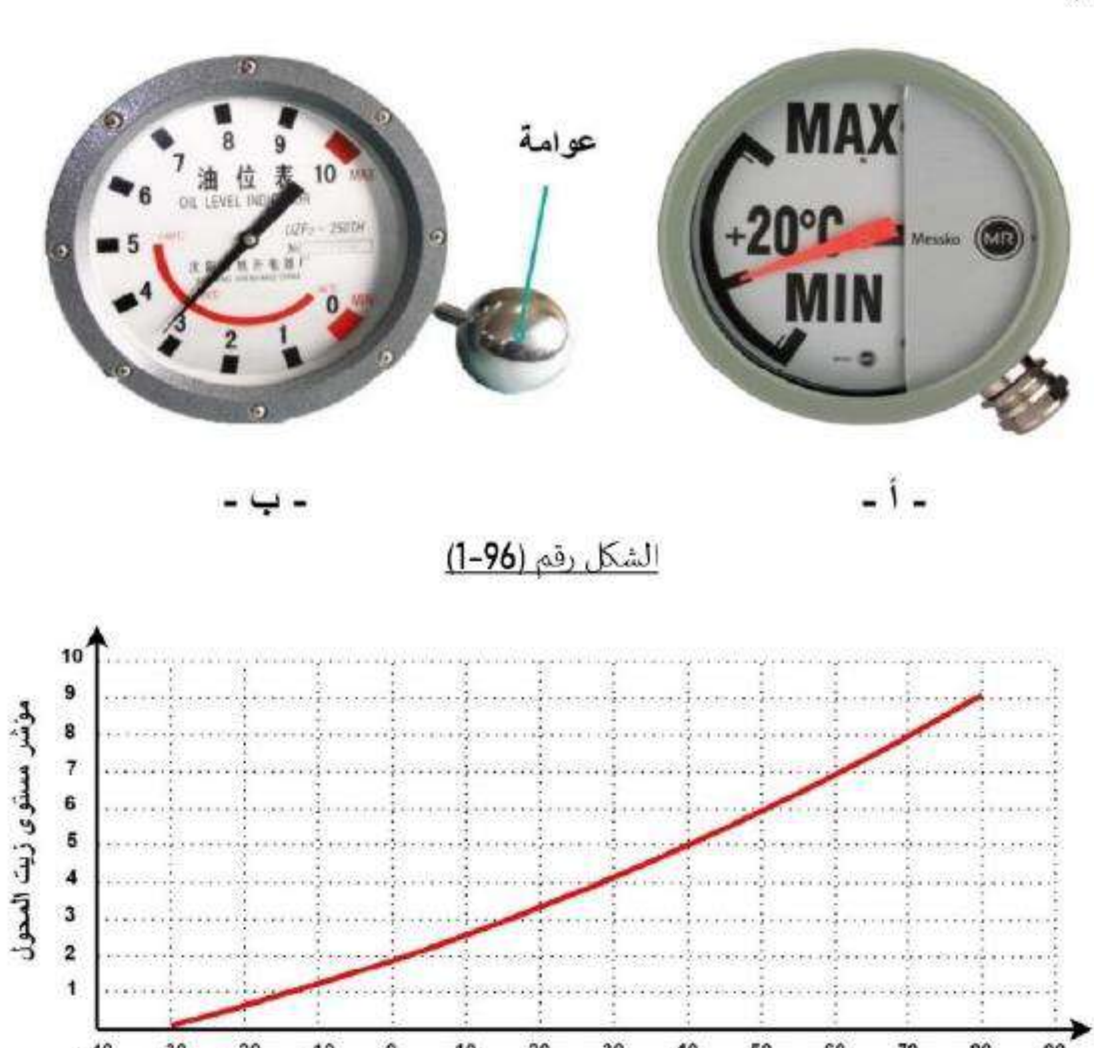
- **مؤشر مستوى الزيت – Oil Level Indicator**

يتم تثبيت مؤشر مستوى الزيت على خزان التعويض (**Conservator tank**) الخاص بالخزان الرئيسي و الخاص بمُغيِّر الخطوة (**Tap-changer**) إن وُجد كما هو مبين في الشكل (25-1)، و تتكون هذه المُعدّة بشكل مُبسط من المؤشر الخاص بمستوى الزيت بالإضافة إلى العوامة (**Float**) الموجودة داخل خزان

التعويض (**Conservator tank**) وتختلف وفقاً للتصميم إذ قد يكون مبدأ العمل مُباشر أو عن طريق تروس و (**Coupling magnet**).

و فيما يَخُص كيفية أخذ قراءة هذا المؤشر فإن التدريج الخاص بهذا المؤشر يختلف من تصميم لأخر، حيث تكتفي بعض التصاميم بوضع متوسط الحد الطبيعي للزيت عند درجة حرارة مرجعية عادة ما تكون (**25°** أو **20°** أو **15°**) درجة مئوية و كذلك الحد الأعلى والأدنى (**Min** و **Max**) لمستوى الزيت كما هو مبين في الشكل [**(1-96)** (أ)]، وبعض التصاميم وضعت أرقام فقط كما هو مبين في الشكل [**(1-96)** (ب)] وأرفقت منحنى خاص بهذا المؤشر يُبيّن مستوى الزيت بالنسبة لدرجة حرارة الزيت في وقت أخذ القراءة كما هو مبين في الشكل **(1-97)**.

وعند وصول المؤشر عند الحد الأعلى أو الأدنى يقوم بإصدار إشار تحذير (**Alarm**) لا تؤدي إلى فصل المحول، وهنالك بعض المحولات يقوم مؤشر مستوى الزيت بإصدار أمر فصل قسري لهذه المحولات (**Trip**).



- ب - - أ -

الشكل رقم (1-96)

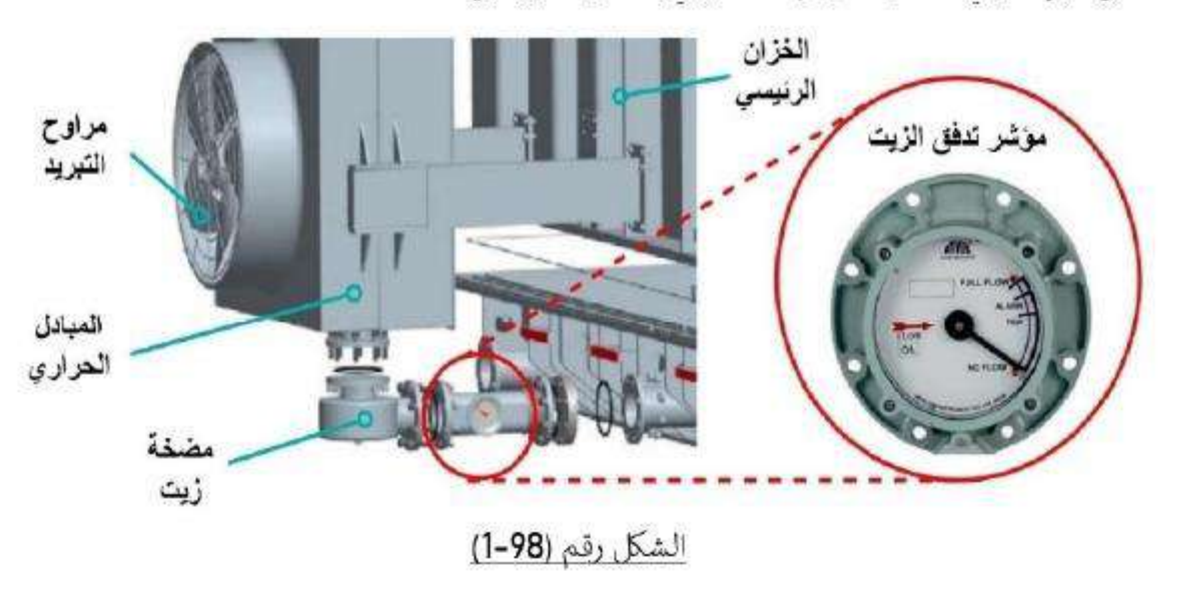
الشكل رقم (1-97)

لقراءة مستوى الزيت الخاص بالشكل [(1-96) (ب)] بشكل صحيح، أولاً نقوم بقراءة الرقم الموجود على المؤشر ومن ثم نقوم بقراءة درجة حرارة الزيت من مؤشر درجة حرارة الزيت، و بعد ذلك وبالرجوع للمنحنى المبين في الشكل (1-97) نقوم بإيجاد مستوى الزيت المثالي.

- **مؤشر تدفُق الزيت – Oil Flow Indicator OFI**

يتم إستخدام هذا المؤشر مع المحولات ذات طريقة التبريد التي تعتمد على الدوران القَسري لزيت المحول (**Oil Forced – OF**) أي التي تحتوي على مضخة زيت، وذلك للتأكد من أن مضخة الزيت تعمل بشكل جيد وتضخ الزيت بالإتجاه الصحيح وكذلك التأكد من عدم وجود إنسداد في طريق الزيت مما يمنع تدفقه بالكمية اللازمة لخزان المحول.

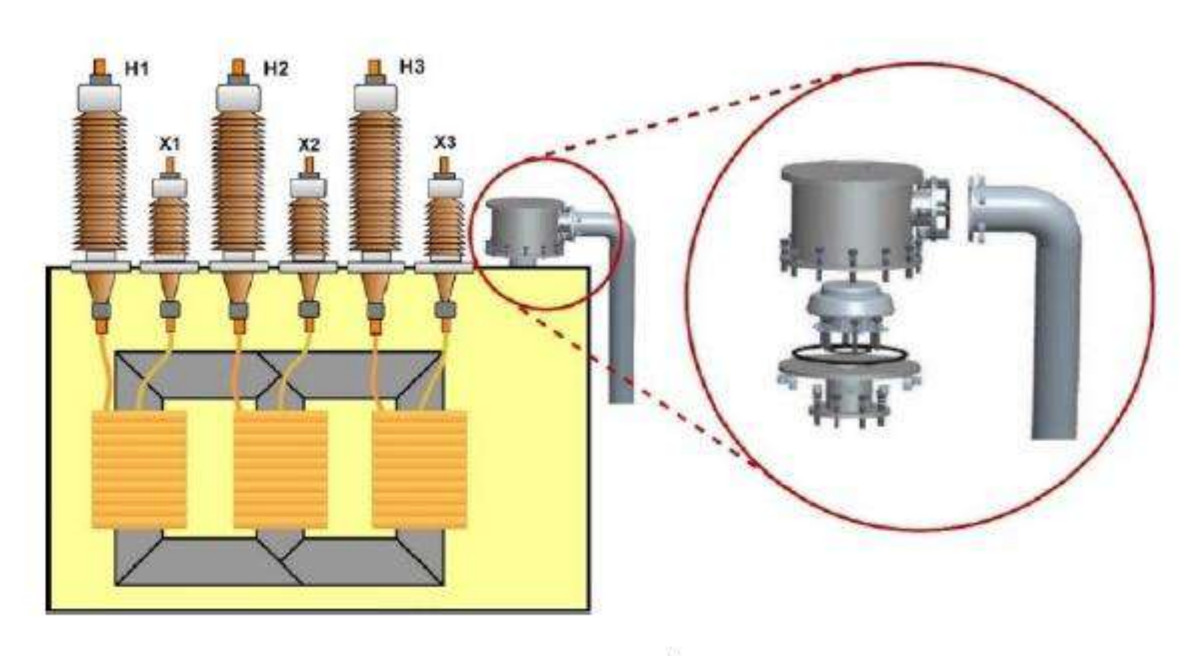
يتم تركيب هذا المؤشر على الأنبوب الرئيسي الواصل بين المُبادل الحراري وخزان المحول الرئيسي كما هو مبين في الشكل (**1-98**)، وعند إنخفاض مِقدار الزيت المُتدفق عن القيمة المضبوطة مسبقاً يَقوم بإصدار إشارة تحذير تفيد بوجود عطل (**Fault Alarm**) و في بعض الحالات يقوم بإصدار أمر فصل قَسري للمحول (**Trip**) في حال إستمر الإنخفاض في مقدار تدفق الزيت.



الشكل رقم (**1-98**)

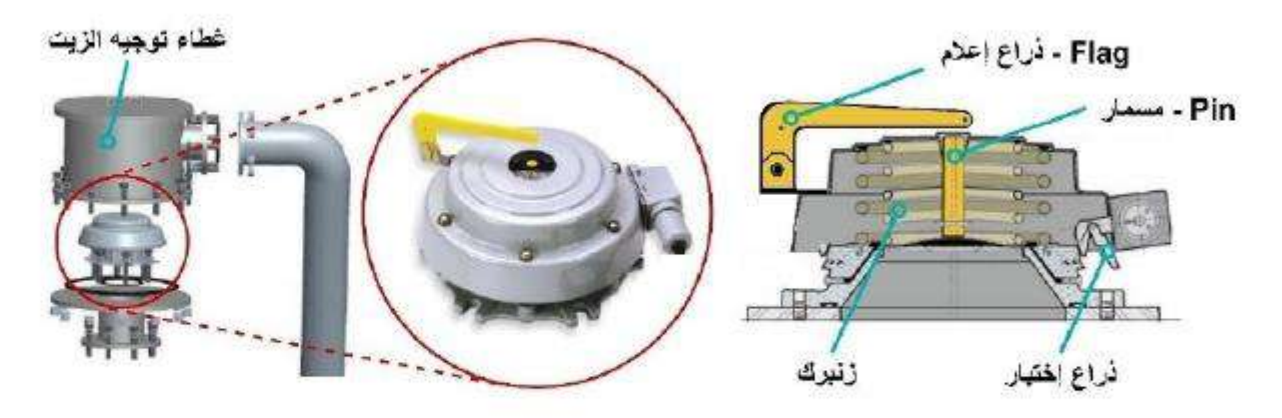
- **صمام الحماية من إرتفاع الضغط بتحرير الزيت – Pressure Relief Valve or Device PRD**

في حال حدوث عطل كبير (خَطِر) ونتيجة للإرتفاع في الضغط بفعل ظاهرة القوس الكهربائي (**Arc flash**) وما ينتج عنها من غازات و زيت مُحترق و لحماية خزان المحول الرئيسي من الإنبعاج أو الإنفجار كان لزاماً أن يتم تركيب صمام يقوم بتحرير كمية من الزيت خارج خزان المحول بهدف تقليل الضغط الداخلي للمحول وهو ما يُسمى بصمام الحماية من إرتفاع الضغط بتحرير الزيت (**PRD**)، حيث يقوم هذا الصمام بتحسس الضغط الداخلي للمحول وعند إرتفاعه عن قيمة مُعينة يتغلب الزيت على ضغط الزنبرك الخاص بهذا الصمام مما يؤدي لفتحه سامحاً للزيت بالخروج من المحول لتخفيف الضغط الداخلي للخزان بزمن مقداره (**2ms**) ملي ثانية و يقوم أيضاً بإصدار أمر فصل قَسري للمحول (**Trip**)، و بعد زوال هذا الضغط يقوم الصمام بالإغلاق مرة أُخرى.



الشكل رقم (1-99)

يتم تركيب هذه الصمام على غطاء الخزان الرئيسي العُلوي للمحول كما هو مبين في الشكل (**1-99**) أو على أعلى حجرة الزيت الخاصة بمغيّر الخطوة (**Tap changer**)، ويتكون هذا الجهاز من زنبرك يقوم بالضغط على غشاء معدني على فوّه أعلى الخزان وفي حال إرتفاع الضغط كما ذُكر سابقاً يرتفع هذا الغطاء ويحرر الكمية اللازمة من الزيت ومن ثم يعود لحالة الإغلاق بعد زوال الضغط مع بقاء المسمار (**Pin**) الظاهر في الشكل (**1-100**) بشكل مُرتفع لأعلى للدلالة على تفعّل هذه الحماية، وأحياناً يتم وضع ذراع إعلام ملون بالأصفر أو الأحمر وظيفته الدلالة على تفعّل هذه الحماية حيث يبقى مرتفعاً بعد زوال الضغط وفصل المحول.



الشكل رقم (1-100)



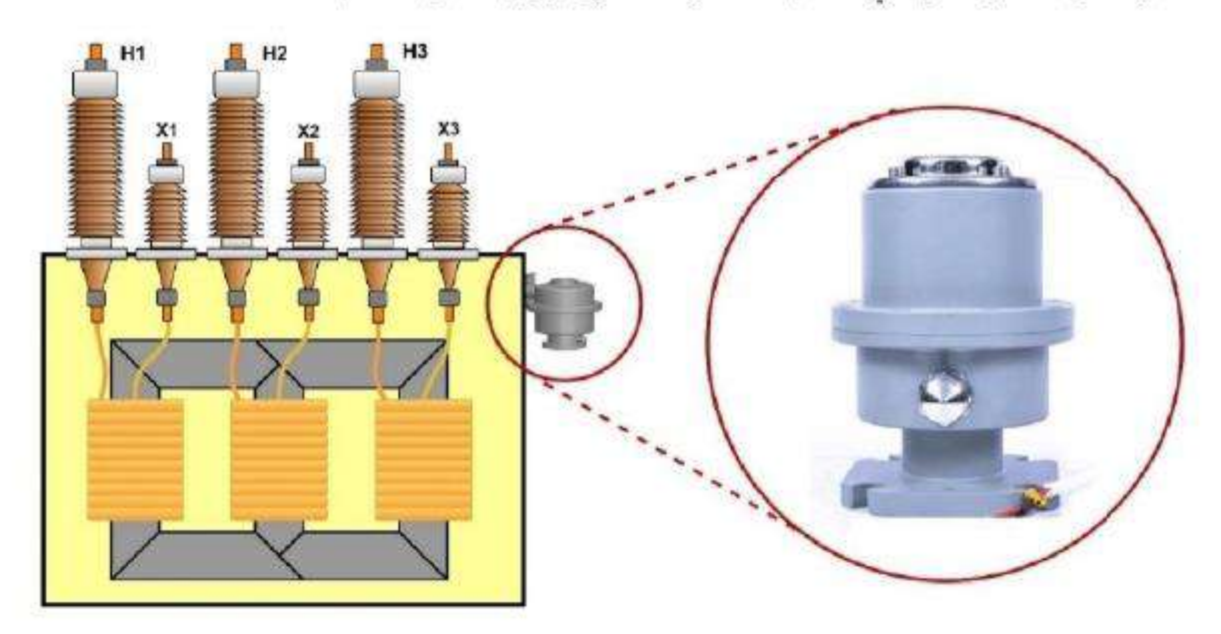
ملحوظة (1-15): تختلف قيمة الضغط التي يعمل عندها هذا الصمام بإختلاف سعة وتصميم المحول، فبالرجوع إلى صمامات الحماية المُصنعة من قبل شركة (**MR**) نجد أن الضغط الذي يتفعّل عنده الصمام من(**0.28bar – 2.07bar**) بار حسب نوع الصمام.



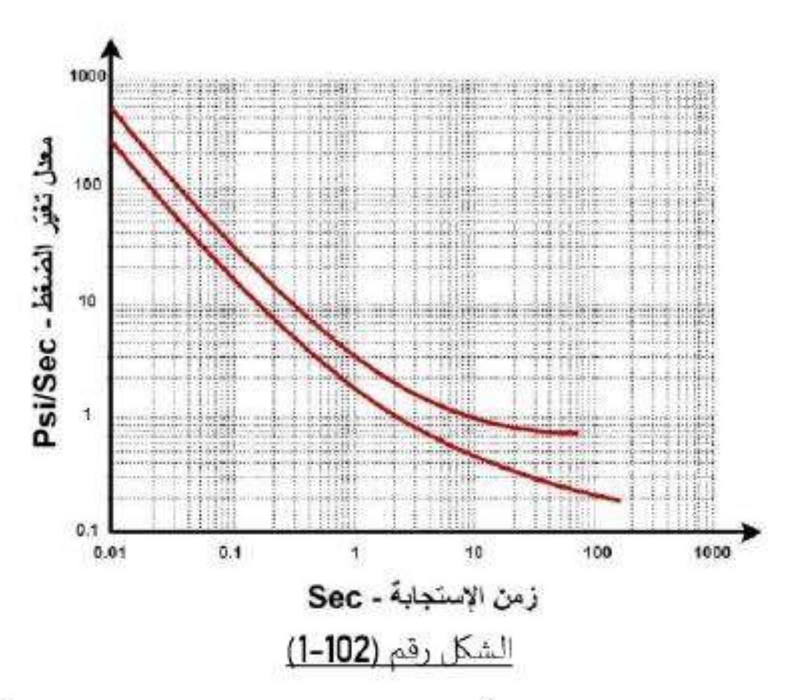
ملحوظة (1-16): عادة ما يَدُل لون المسمار (**Pin**) على نوع مائع العزل داخل المحول، فبالرجوع إلى الكُتيب التفصيلي الخاص بصمام الحماية من الضغط (**PRD**) المُصنع من قبل شركة (**QUALITROL**) سنجد أن اللون الأصفر يدل على الزيت المعدني واللون الأحمر يدل على زيت الأسكاريل و اللون الأزرق يدل على الزيت السيليكوني.

• مُرحل الحماية من الإرتفاع المفاجئ للضغط – Rapid Pressure Rise Relay RPRR

ويُسمى أيضاً بالـ (**Sudden Pressure Relay**)، حيث يَشترك هذا المُرحل (**RPRR**) و صمام الـ(**PRD**) سابق الذكر في نفس الوظيفة وهي حماية المحول من إرتفاع الضغط في حال حدوث قوس كهربائي داخلي (**Internal Arc**)، ولكنهما يفترقان في أن صمام الـ(**PRD**) ذو قيمة ضغط تشغيلي إستاتيكي ثابتة وأيضاً زمن تشغيلي ثابت أي أنه يعمل في حال إرتفع الضغط الداخلي للمحول عن قيمة معينة محددة مسبقاً وأيضاً يقوم بتحرير الزيت خارج الخزان، أما فيما يَخُص مُرحل الحماية من الإرتفاع المفاجئ للضغط (**RPRR**) فإنه يعمل وفقاً لإرتفاع الضغط الديناميكي كنتيجة لمعدل سرعة تغيّر الضغط داخل المحول ولا يقوم بتحرير الزيت خارج الخزان بل يكتفي بإصدار أمر فصل قسري للمحول (**Trip**)، أي أنه كلما كان إرتفاع الضغط داخل المحول أسرع كلما كان زمن الإستجابة أقل، ويُقصد بزمن الإستجابة الزمن اللازم لإصدار أمر الفصل القَسري للمحول (**Trip**) كما هو مبين بالشكل (**1-102**). وعادةً ما يتم تركيب هذا المُرحل على أعلى جدران الخزان الرئيسي الجانبية للمحول كما هو مبين بالشكل (**1-101**).



الشكل رقم (**1-101**)



الشكل رقم (1-102)

الشكل (**1-102**) يبين العلاقة بين سرعة التغيُّر في الضغط الداخلي للمحول و الحد الأعلى والأدنى لزمن الإستجابة لأحد أنواع مرحلات الحماية من الإرتفاع المفاجئ في الضغط المُصنع بواسطة شركة (**QUALITROL**).

- ## قرون التفريغ – Arcing Horns

و تُسمى أيضاً بفجوة التفريغ (**Spark Gap**)، و يتم تركيبها على عوازل إختراق المحولات (**Bushings**) وذلك لحماية عازل الإختراق (**Bushing**) من شرارة القوس الكهربائي التي قد تظهر نتيجة لتعرضها لفولتيات مرتفعة ذات تردد مرتفع بفعل البرق أو إختلاف الأحمال المفاجئ أو حدوث الأعطال.

و تتكون قرون التفريغ (**Arcing horns**) من زوج من الموصلات يتم تركيبها على رأس عازل الإختراق (**Bushing**) وعلى قاعدة تثبيته (**Mounting Flange**) ومنه للأرض، بحيث يفصل بين هذه الموصلات فجوة هوائية كما هو موضح بالشكل (**1-103**). وعند تعرض عازل الإختراق (**Bushing**) و قرون التفريغ (**Arcing horns**) لفولتيات مرتفعة تنهار عازلية الفجوة الهوائية بين موصلي قرون التفريغ (**Arcing horns**) مصدرة شرارة قوس كهربائي (**Arc flash**) ليتم التفريغ عبر القرون عوضاً عن سطح العازل الخارجي لعازل الإختراق (**Bushing**).

فجوة هوائية

الشكل رقم (1-103)

و يتناسب طول الفجوة الهوائية بين موصلات قرون التفريغ (**Arcing horns**) مع مِقدار الـ(**Lightning Impulse withstand voltage**) للمحول وعادة ما تكون أقل من مسافة التفريغ (**Flash-over distance**) لعوازل إختراق المحول، وقد أوردت بعض

الشركات إقتراحات لطول الفجوة الهوائية وفقاً لنوع عازل الإختراق (**Bushing**) المُصنع من قِبَلها بالإضافة إلى مستوى الفولتية التشغيلية لعازل الإختراق (**Bushing**) كما هو مبين بالجدول (**11-1**) و الذي يتضمن طول الفجوة الهوائية المقترح لعازل الإختراق (**Bushing**) المحولات من طراز (**PNO**) المُصنع بواسطة (**Passoni & Villa**) أو (**General Electric- GE**) حالياً.

الجدول رقم (**11-1**)

الفولتية الإسمية، كيلوفولت	طول الفجوة الهوائية، ملم
52	320
72.5	450
100	600
123	750
145	900
170	1000
245	1450

- ## حارفة/مانعة الصواعق – Surge Arrester SA

تُعد قرون التفريغ (**Arcing horns**) سابقة الذِكر أكثر الوسائل شيوعاً للتخلص من الفولتيات المرتفعة ذات التردد المرتفع في الشبكة وذلك لبساطة تركيبها و سعرها المنخفض، ولكن من أوجه قصورها أنها غير قادرة على منع التيارات التابعة أو ما يُسمى بال(**Follow-on currents**) وهي التيارات التي تتبع حدوث إنهيار الفجوة الهوائية لقرون التفريغ عند تعرضها للفولتيات العالية مما يؤدي لحدوث قِصر مؤقت، بالإضافة إلى بعض الأعطال الناتجة عن العمل الخاطئ لقرون التفريغ نتيجة لتجمع الطيور عليها مثلاً.

بناءاً على ما سبق و خاصة في أنظمة الفولتية المرتفعة عادة ما يتم إستخدام حارفة/مانعة الصواعق (**Surge Arrester**) على التوازي مع عوازل إختراق المحولات (**Bushings**) للحد من تأثير الفولتيات المرتفعة عليها و الحَوّل دون حدوث شرارة قوس كهربائي. و تتكون حارفة/مانعة الصواعق (**SA**) من أقراص أكسيد معدن (**Metal Oxide MO**) وعادة ما يتم إستخدام أقراص أكسيد الزنك (**Zn**) و تعرف بإسم (**Zinc Oxide Arresters ZnO**)، وتكون هذه الأقراص مُرتبة بشكل عامودي في متوسط الحارفة (**SA**) و معزولة من الخارج بالبورسلان أو المطاط كما هو مبين بالشكل (**104-1**).

عند تعرض الحارفة (**SA**) لفولتيات عالية ذات تردد مرتفع تنخفض قيمة معاوقتها لمرور التيار مما يؤدي إلى مرور التيار إلى الأرض وتفريغ الفولتيات العالية غير المرغوب بها، وبعد زوال هذه الفولتيات ترتفع قيمة المعاوقة الخاصة بهذه الحارفة (**SA**) لتمنع بدورها مرور التيارات.

الشكل رقم (**104-1**)

عادة ما يتم تركيب جهاز على كيبل الحارفة (**SA**) الواصل مع الأرضي يحتوي على عداد يبين عدد مرات عمل الحارفة (**SA Switch-On Counter**) بالإضافة إلى مؤشر تيار بالملي أمبير (**mA**) ليُعطي إنطباع عن حالة الحارفة (**SA**) الداخلية كما هو مبين بالشكل (**1-104**)، ففي وضع التشغيل الطبيعي للحارفة (**SA**) وعندما تكون موصولة بالفولتية التشغيلية الطبيعية لابد من وجود تيار تسرُبي صغير بقيمة لا تتجاوز بضع ملي أمبيرات ليعطي إنطباع أن الحارفة (**SA**) لا تُشكل دائرة مفتوحة مئة بالمئة وأنها في حال تعرضها لفولتيات مرتفعة سوف تقوم بعملها على أكمل وجهه.

- **حلقات الكورونا و التدريج – Corona and Grading Rings**

تتشابه حلقات الكورونا وحلقات التدريج من حيث العمل والشكل، فكلاهما ذو شكل حلقي من الألمنيوم و يهدف إلى تدريج أو تشتيت المجال الكهربائي الناتج عن الفولتيات العالية (أكبر من **230** كيلوفولت) و ذلك لمنع حدوث تفريغ كهربائي (**Discharge**)، ولكنهما يفترقان في مكان التركيب حيث يتم تركيب حلقات الكورونا (**Corona rings**) أعلى عازل الإختراق (**Bushing**) أو حارفة/مانعة الصواعق (**Surge Arrester - SA**) حول نقطة توصيل مُوصل الفولتية المرتفعة (**HV Conductor termination point**) وذلك لما تحويه هذه المنطقة من حواف حادة من شأنها زيادة المجال الكهربائي في هذه المنطقة مما يزيد إحتمال حدوث تفريغ كهربائي وكذلك عمل تداخل على موجات الراديوية، حيث تُقدر قيمة الفولتية التدميرية - التي يحصل بعدها تفريغ كهربائي - بحوالي (**30 kV/cm**) كيلوفولت/سم.

أما فيما يَخُص حلقات التدريج فإن لها نفس الوظيفة سابقة الذِكر ولكن يتم تركيبها حول أعلى العزل الخاص بعوازل إختراق الفولتية المرتفعة (**HV Bushings**) أو حارفة/مانعة الصواعق (**Sarge Arrester**) وذلك لتوزيع المجال الكهربائي على كامل العزل الخارجي الخاص بها ومنعه من التركّز في مكان معين - عادة الجزء العلوي من العزل والأقرب لمُوصل الفولتية المرتفعة - مما يؤدي لإنهياره كما يَظهر في الشكل (**1-104**).

الملحق (1-1)

تسمية أطراف المحول وفقاً للمعايير المختلفة

لا بُد من الإحاطة بالتسميات المُختلفة لأطراف المحولات وفقاً للمعايير العالمية وذلك لزيادة الفهم عند ذِكرها في قادم الفصول.

Australian standards : المعايير الأسترالية
ANSI : المعهد الأمريكي للمعايير الوطنية
IEC : اللجنة الكهروتقنية الدولية

المعيار	أطرف ملفات الفولية المرتفعة	أطراف ملفات الفولتية المنخفضة	أطراف الملفات الثالثة
	HV winding	LV winding	Tertiary winding
ANSI	H1 – H2 – H3 – H0	X1 – X2 – X3 – X0	Y1 – Y2 – Y3 – Y0
IEC	1U – 1V – 1W - 1N أو U – V – W – N	2U – 2V – 2W – 2N أو u – v – w – n	3U – 3V – 3W – 3N
Australian standards	A1 – A2 – A3 - N	a1 - b2 - c3 - n	3A – 3B – 3C – 3N

الملحق (2-1)

مصادر الأشكال الواردة في الفصل الأول

<table>
<tr><th>المصدر</th><th colspan="30">الأشكال</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Turbosquid.com
by ArtGraphic3d Studio</td><td colspan="5">1-33</td><td colspan="5">1-32*</td><td colspan="5">1-31*</td><td colspan="5">1-28</td><td colspan="5">1-27</td><td colspan="5">1-19</td></tr>
<tr><td colspan="5">1-77</td><td colspan="5">1-69</td><td colspan="5">1-68</td><td colspan="5">1-67</td><td colspan="5">1-50</td><td colspan="5">1-49</td></tr>
<tr><td>AREVA Power Transformers
Expertise Vol.1 & 2</td><td colspan="6">1-30</td><td colspan="6">1-29</td><td colspan="6">1-26</td><td colspan="6">1-21</td><td colspan="6">1-20</td></tr>
<tr><td>Electrical4u.com</td><td colspan="15">1-25</td><td colspan="15">1-24*</td></tr>
</table>

* جزء من الشكل

الفصل الثاني

فحص مقاومة العزل

Insulation Resistance Test (IR)



فحص مقاومة العزل
Insulation Resistance Test

يُعتبر فحص مقاومة العزل أو كما يُسمى بال(**Megger test**) من أقدم الوسائل للتأكد من جودة وكفاءة العزل حيث تم إدراجه كأحد الفحوصات الواجب إجراؤها على التطبيقات الكهربائية في نهايات القرن التاسع عشر (**1880's**) في الإصدار الأول لنشرة الأنظمة الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء (**IEE**)، حيث تدور فلسفة هذا الفحص بقياس مقاومة المادة العازلة لتسرُب التيار من خلالها، هذه المقاومة التي تُعطي تصوّر عن حالة المادة العازلة وتُعبّر عن جودتها. فكما هو معلوم ومع مرور الوقت تختلف خصائص المادة العازلة وغالباً ما يكون هذا الإختلاف للأسوء نتيجة لتقادم هذه المادة العازلة، ومنه فإن وظيفة هذا الفحص هو إعطاء إنطباع عن حالة المادة العازلة بشكل روتيني أو بعد تعرضها لظروف جوية قاسية كالحرارة والرطوبة والأوساخ، أو نتيجة لتعرضها لإجهاد كهربائي كالفولتيات المرتفعة أو إجهاد ميكانيكي كالصدمات أو الإهتزازات أدى لحدوث أضرار فيزيائية لهذه المادة العازلة كالشقوق أو غيرها من الأضرار الفيزيائية التي تؤدي لضعفها وزيادة قيمة التيار المُتسرب من خلالها. ونظراً لأن مقدار فولتية الفحص أقل من أو مساوي لمقدار الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول، فإن هذا الفحص يُعتبر من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**) أي أنه لا يؤثر على سلامة العزل.

وتتلخص سلامة أي محول في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل و النظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة نظام العزل وذلك بالكشف عن حالة المادة العازلة للملفات (**Windings**) و القلب الحديدي (**Iron Core**) وكذلك دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي (**Core Clamp**).

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعُنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المَصنعيّة (**Quality Control - QC**) وكذلك يُعتبر من فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهربة المحول للمرة الأولى (**Transformer first energization**) كأحد فحوصات القُبول المَوقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد عمليات الصيانة المُختلفة في الموقع.

1.4 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد توقفه لفترة طويلة من الزمن.

1.5 بشكل روتيني (**Routine test**) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (**Reference value**).

1.6 تحديد الأعطال داخل المحول (**Fault detection – Diagnostic test**)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن جودة وكفاءة المادة العازلة في المحول لذلك عادة ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرض المحول لظروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على المادة العازلة داخله وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- في حال ظهور إشارة تحذير (**Alarm**) أو حدوث فصل قسري للمحول (**Trip**) نتيجة لتفعّل مُرحل البوخلز (**Buchholz relay**).
- حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الذائبة في الزيت (**Dissolved Gas Analysis - DGA**) وخاصة عند ظهور غازات إحماء المعدن (**Hot metal gases**) الناتجة عن إحماء الحديد المُكوّن للقلب الحديدي للمحول أو دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي والتي تتمثل في الغازات التالية (الميثان – CH_4 و الإيثان – C_2H_6 و الإيثيلين – C_2H_4).
- في حال إرتفاع درجة حرارة المحول، الذي قد يكون ناتج عن القلب الحديدي أو دعائمه نتيجة لوجود مشكلة في نظام العزل الخاص بهما.
- تعرُّض المحول لإجهاد ميكانيكي (**Mechanical stress**) كالإهتزازات أو النقل أو الصدمات.
- تعرُّض المحول لإجهاد حراري (**Thermal stress**) كإرتفاع الحرارة الشديد أو إنخفاضها.
- تعرُّض المحول لإجهاد كهربائي (**Electrical stress**) كالفولتيات المرتفعة أو الموجات العابرة.
- تعرُّض المحول لإجهاد كيميائي (**Chemical attack**) كالأوساخ والزيت أو أبخرة المواد الآكلة (**Corrosive vapor**).
- الظروف المحيطة بالمحول (**Environment**) كالحرارة والرطوبة المرتفعة.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص تدهور أو إنهيار المادة العازلة داخل المحول نتيجة لتسرُب الرطوبة لداخل هذه المادة العازلة أو وجود أضرار فيزيائية لحقت بها كالتشققات أو الثقوب أو وجود فجوات هوائية.

3. فلسفة الفحص

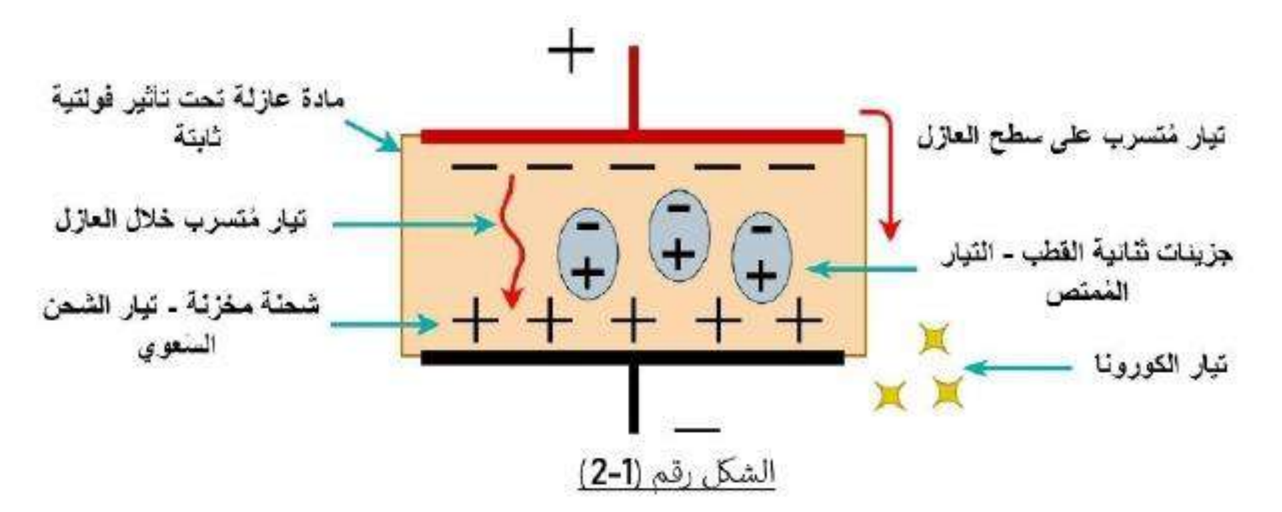
تكمُن وظيفة المادة العازلة الخاصة بالمحولات في إبقاء التيار الكهربائي داخل موصلاته أو ما يُسمى بالملفات، وتسرُب هذه التيار الكهربائي إلى خارج الملفات يجعله من غير المفيد بل والخطير في بعض الأحيان، لذلك يُمكن الإستنتاج من أن خصائص هذه المادة العازلة على النقيض من خصائص المادة الموصلة المُكوَّنة للملفات كالنحاس أو الألمنيوم، فالأخيرة من أهم خصائصها المقاومة القليلة لمرور التيار أما المادة العازلة فمن أهم خصائصها المقاومة المرتفعة لمرور التيار مما يَحول دون مرور التيار من خلالها وجعل مروره مقتصراً على موصلاته فقط إي داخل ملفات المحول، لذلك فإن مبدأ هذا الفحص يَدور حول قياس مقاومة المادة العازلة للتأكد من سلامتها و أنها قادرة على القيام بوظيفتها المناطة بها.

يُستخدم لقياس مقاومة العزل جهاز يُسمى ميجر أو ميجا أوميتر (**Megger** أو **Megohmmeter**)، وسُمي بهذا الإسم لأنه عادةً ما تكون قيمة المقاومة المُقاسة في هذا الفحص بالميجا أوم (**Mega Ohm**). ويحتوي هذا الجهاز على مولد تيار ثابت (**Direct Current Generator**) حيث يَقوم هذ الجهاز بتطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) على الجُزء المُراد قياس مقاومة عزله كالملفات أو القلب الحديدي أو دعائم تثبيت القلب الحديدي والذي بدوره يؤدي الى مرور تيار تسرُبي قليل من خلال هذا العزل ومنه يتم إحتساب قيمة المقاومة وفقاً لقانون أوم (**Ohm's Law**). ويُمكن أن يَكون هذا الجهاز يدوي (**Hand-driven**) كالنسخ القديمة منه أو ذو محرك كهربائي (**Motor-driven**) أو إلكتروني (**Electronic**).

كما ذُكر سابقاً أن المادة العازلة ذات مقاومة مرتفعة وقيمة التيار المُتسرب من خلالها مساوٍ للصفر نظرياً وهذا ما يُسمى بالعازل المثالي، أما في الواقع فإنه عند تطبيق فولتية ثابتة (**DC voltage**) على العازل تنشأ تيارات تسربية داخل وعلى سطح هذا العازل والتي من خلالها يتم إحتساب قيمة مقاومة هذا العازل و تتكون هذه التيارات من المُركَبات التالية:

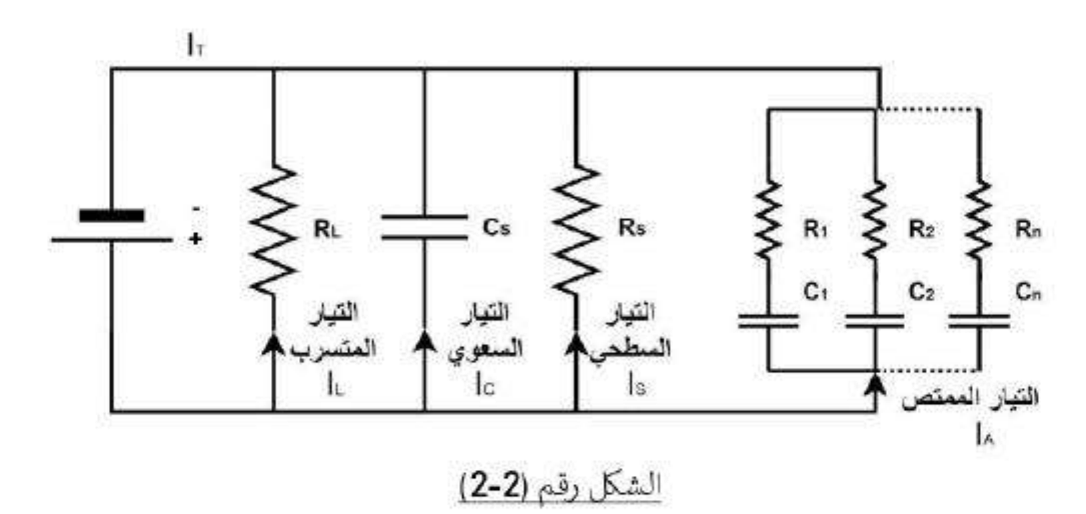
- ✓ تيار الشحن السَعوي - **Capacitive Charging Current**.
- ✓ التيار المُمتص من العازل - **Dielectric Absorption Current**.
- ✓ التيار المُتسرب او المُوصل - **Conduction or Leakage Current**.
- ✓ تيار التفريغ الجزئي (ظاهر الكورونا) - **Partial Discharge Current (Corona)**
- ✓ تيار التسرُب السطحي - **Surface Leakage Current**

الشكل (2-1) يوضح مُركبات التيار المُتكوّنة نتيجة لتطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) على المادة العازلة.



الشكل رقم (2-1)

كما ويُمكن رسم الدائرة المُكافئة للمادة العازلة و هي تحت تأثير فولتية الفحص الثابتة كما هو مُبين في الشكل (2-2) والذي يوضح مُركبات التيار المُتسرب عبر المادة العازلة وعلى سطحها [IEEE Std 43-2013].



الشكل رقم (2-2)

- **المُركّبة الأولى: تيار الشحن السعوي - Capacitive Charging Current I_C**

و هو تيار يبدأ بقيمة مرتفعة ثم ينخفض الى أدنى قيمه له - قرابة الصفر - بعد شحن مواسعة المادة العازلة إلى الفولتية الكاملة (Full voltage)، و عادةً يحتاج هذا التيار إلى عشرات الثواني لكي يَقل الى أدنى مستوى له حيث يُمكن إهماله مقارنة بالتيارات الأخرى. كما ويعتمد هذا التيار على مقدار فولتية الفحص وكذلك حجم ونوع المحول المُراد فحصه.

ولحساب قيمة هذا التيار السَعوي يُمكن تطبيق المعادلة (2.1) التالية:

$$I_C = \left(\frac{E}{R}\right) e^{-t/RC} \qquad (2.1)$$

حيث؛

I_C : تيار الشحن السعوي.

E : فولتية الفحص بالكيلوفولت (**kV**).

R : المقاومة بالميجا أوم (**MΩ**).

C : المواسعة بالمايكروفاراد (**µF**).

t : الزمن بالثواني (**s**).

- **المُركّبة الثانية: التيار المُمتص من العازل - Dielectric Absorption Current I_A**

و هو تيار يُمثل الطاقة الإضافية اللازمة لإعادة توجيه – ترتيب - جزيئات المادة العازلة نتيجة لتأثير المجال الكهربائي المُطبق عليها أثناء فحص مقاومة العزل، ويكون التيار بالبداية مرتفع ثم ينخفض الى أدنى قيمه له - قرابة الصفر – بعد توجيه أغلب جزيئات هذه المادة العازلة، وعادةً ما يحتاج هذا التيار من عدة ثواني إلى عدة دقائق للمحولات لكي يَصل الى أدنى مستوى له حيث يُمكن إهماله مقارنة بالتيارات الأخرى. وتَجدُر الإشارة إلى أن التناقص في قيمة هذا التيار يتناسب عكسياً مع مِقدار المواسعة التي يُشكلها العازل وكذلك يعتمد هذا التيار على نوع المادة العازلة ووضع المادة العازلة (**Insulation Condition**) من مستوى ملوثات أو رطوبة بداخلها.

ولحساب قيمة هذا التيار المُمتص يُمكن تطبيق المعادلة (**2.2**) التالية:

$$I_A = ECDT^{-n} \qquad (2.2)$$

حيث؛

I_A : التيار المُمتص.

E : فولتية الفحص بالكيلوفولت (**kV**).

C : المواسعة بالمايكروفاراد (**µF**).

D, n : ثوابت.

ومما سبق من تعريف لتيار الشحن السَعوي (I_C) و التيار المُمتص (I_A) من العازل ونتيجة لقيمتهما الإبتدائية المرتفعة، ووفقاً لقانون أوم (**Ohm's Law**) يُمكن ملاحظة السبب الرئيسي وراء إنخفاض قيمة مقاومة العزل (**Insulation Resistance**) في الثواني الأولى لهذا الفحص، والذي بدوره يجعل قيمة هذه المقاومة في بداية الفحص مُهملة ولا تعكس الحالة الواقعية للمادة العازلة بل ويجب الإنتظار حتى تتلاشى هذه التيارات (I_A و I_C) و ترتفع قيمة مقاومة العزل ومن ثم نقوم بتسجيلها لتكون ذات فائدة.

- **المُركّبة الثالثة: التيار المُتسرب او المُوصل - Conduction or Leakage Current I_L**

وهو يُمثل التيار المُتبقي بعد إنخفاض قيمة التيارين (I_A و I_C) السابقين حيث أنه التيار المُتسرب أو المُوصل من خلال المادة العازلة وهو التيار المطلوب لِحساب قيمة مقاومة العزل كما هو مبين بالشكل **(2-3)**، حيث تبدأ قيمة هذا التيار من الصفر وتتصاعد إلى حد معين ثم تبقى ثابتة إلى إنتهاء الفحص.

- ولكن يبقى التساؤول المطروح "كيف يُعطينا التيار التسرُبي خلال المادة العازلة إنطباع عن حالة هذه المادة العازلة الداخلية ومدى كفائتها؟".

كما هو معلوم أن المادة العازلة تمتلك خاصية إمتصاص الشحنات الكهربائية و وتوصيلها بشكل دائم أو مؤقت، لذلك عند تطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) على هذا المادة العازلة فإن جزيئات هذه المادة الحاملة للشحنات الموجبة والسالبة تتأثر بالفولتية المُطبقة، وكمثال على جزيئات المادة العازلة هنالك ما يُسمى بجزيئات ثنائية القطب (**Diploes**) و سُميت كذلك لحملها شحنة موجبة صغيرة على أحد أطرافها وعلى الطرف الآخر شحنة صغير سالبة، وعند تعرض هذه الجزيئات ثنائية القطب (**Dipoles**) للفولتية الثابتة وما ينتج عنها من مجال كهربائي تقوم هذه الجزيئات بالإصطفاف بإتجاه المجال الكهربائي المُطبّق أو ما يُسمى بإستقطاب الجزيئات ثنائية القطب (**Dipoles polarization**) حيث أن الطاقة اللازمة لعملية الإستقطاب يُمكن تمثيلها بالتيار المُمتص (**Absorption current**).

ولكن هنالك جزيئات تحمل شحنة داخل المادة العازلة ولكنها حرة أي ليست كجزيئات ثنائية القطب سابقة الذِكر وهذا ما يتيح حركتها بين الأقطاب الموجبة والسالبة للفولتية المُطبقة على المادة العازلة والتي يُمكن تمثيلها بالتيار التسربي خلال العازل (**Leakage current**)، وهذا بدوره يُفسّر العلاقة بين قيمة التيار التسرُبي وحالة المادة العازلة للمحول.

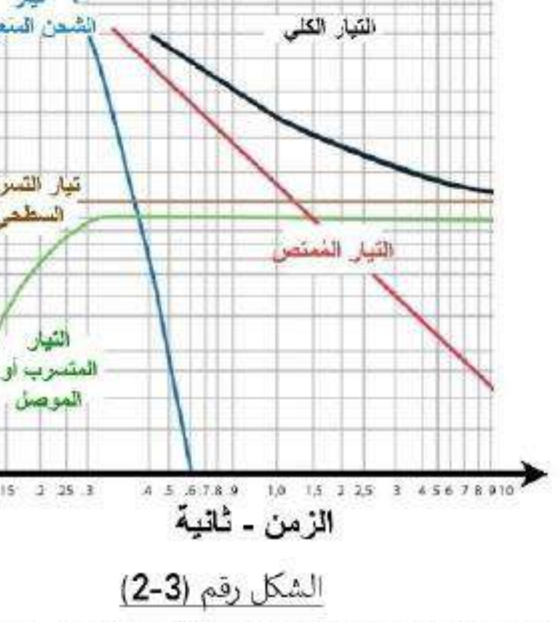
- **المُركّبة الرابعة: تيار التفريغ الجزئي (تيار الكورونا) – Partial Discharge Current I_P**

أو كما يُسمى بتيار الكورونا وهو نتيجة للإجهاد الكهربائي الذي يتعرض له الهواء المحيط بالمنطقة المشحونة بالفولتية المرتفعة خاصة تلك الحواف الموصلة الحادة، وعادةً ما يظهر هذا التيار عند الفولتيات المرتفعة الأكبر من (**4kV**) كما ويُمكن إهماله عند إجراء هذا الفحص لغايات التبسيط.

- **المُركّبة الخامسة: تيار التسرب السطحي - Surface leakage Current I_S**

وهو التيار المار على سطح العازل الخارجي، أي التيار المار بالمقاومة الموجودة على التوازي مع مقاومة العازل كما هو مُبين بالشكل **(2-2)**، وهذا التيار يعتمد على نظافة ورطوبة سطح العازل ويكون ذو قيمة ثابتة مع مرور الزمن.

يُمكن للملوثات أو قطرات الندى المُتكوِّنة على سطح العازل أن تزيد من تيار التسرب السطحي للعازل، وعادةً ما يتم ملاحظة هذه الظاهرة عند إجراء هذا الفحص في ساعات الصباح الباكر في الأجواء الباردة، حيث أن قطرات الندى المُتكونة على سطح المادة العازلة (البورسلان) مثلاً من شأنها زيادة تيار التسرب السطحي والذي بدوره يؤثر على دِقة هذا الفحص، لذلك وللتخلص من هذه المُركّبة يجب تنظيف سطح العازل جيداً قبل إجراء الفحص كتنظيف العزل الخارجي – البورسلان عادةً – عند فحص المحولات، وكذلك إجراء الفحص في درجة حرارة جو محيطة مناسبة مع أخذ رطوبة الجو بعين الإعتبار، بالإضافة إلى إمكانية إستخدام مَنفذ الـ(**Guard**) في أجهزة فحص مقاومة العازل ليقوم بتحسس هذا التيار وطرحه من القيمة الكُلية للتيار المُقاس ليتم الحصول على قيمة مقاومة عازل أكثر دِقة كما سيتم شرحه لاحقاً.



الشكل رقم (2-3)

وقبل الخوض في تفاصيل الفحص لا بُد من الإجابة عن سؤال في غاية الأهمية وهو "لماذا يتم هذا الفحص بتطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) عِوضاً عن الفولتية المترددة (**AC Voltage**) المُتعارف عليها والتي يعمل عليها المحول في ظروف التشغيل الطبيعية؟ وهل يُمكن الكشف عن حالة المادة العازلة من خلال تطبيق فولتية مترددة (**AC Voltage**)؟"

كإجابة سريعة عن الشِق الثاني للتساؤل يُمكن القول "نعم" يُمكن للفولتية المترددة (**AC Voltage**) الكشف عن حالة العازل في بعض المواطن كما هو الحال في فحص الفولتية المرتفعة (**Hi-pot test**) وفحص معامل التبديد أو القدرة (**DF/PF**)، أما فيما يَخُص الشِق الأول من التساؤل تم عمل مُقارنة بين الفولتيتين (**AC & DC**) و إدراجها في الجدول (**1-2**) مما يُتيح فهم أكثر لهذا الفحص.



ملحوظة (1-2): يُمكن التعبير عن قيمة هذا الفحص بالتيار التسرُبي من خلال العازل (**mA or µA**) أو مقاومة هذا العازل (**kΩ, MΩ, GΩ or TΩ**)، حيث أن بعض الأعطال يَسهُل الكشف عنها بمراقبة تيار التسربي عوضاً عن المقاومة إلا أن قيمة المقاومة هي الأكثر إنتشاراً للتعبير عن هذا الفحص. وتَجدُر الإشارة إلى أن اجهزة الفحص المختلفة والمُصنّعة بواسطة كبرى الشركات مثل (**MEGGER & METREL**) وغيرها من الشركات تتيح إختيار فيما إذا أردت أن تكون نتيجة الفحص على شكل تيار متسرب أو مقاومة عزل.

الجدول رقم (1-2)

وجه المقارنة	الفحص بإستخدام فولتية مترددة AC voltage	الفحص بإستخدام فولتية ثابتة DC Voltage
التيارات الناتجة عن الفحص	تيار سَعوي كبير تيار تسرب مادي وتيار مُمتص قليل	تيار سَعوي قليل تيار تسرب مادي ومُمتص كبير وهو المطلوب لقياس مقاومة العازل
الغاية من الفحص	معرفة مدى تحمل المادة العازلة للفولتيات المرتفعة (يُعطي دلالة على مدى جودة العزل دون قيمة مُقاسة)	معرفة قيمة مقاومة المادة العازلة (يُعطي قيمة مُقاسة تُعبّر عن مدى جودة العزل)
خطورة الفحص على العازل	خطير (تدميري) نتيجة لتطبيق فولتيات مرتفعة	غير خطير (غير تدميري)
إمكانية تعويض الفولتيتين	لا يُمكنه تعويض فحص الفولتية الثابتة	يُمكنه تعويض فحص الفولتية المترددة وذلك بزيادة قيمة الفولتية الثابتة المُطبقة حيث يُعطي نفس النتيجة
التكلفة والوزن والحجم لجهاز الفحص	كبير	قليل

4. أمور لا بُد من مراعاتها قبل البدء بالفحص

4.1 إستقرار درجة حرارة المحول

كما هو معلوم أن قيمة المقاومة من القيم التي تتأثر بالحرارة بشكل كبير، لذلك وللحصول على قيمة مقاومة عزل حقيقية وللحد من تأثير الحرارة على قيمة هذه المقاومة يجب التأكد من إستقرار درجة حرارة زيت وملفات المحول قبل القيام بالفحص، أيضاً يجب تجنب القيام بالفحص في درجة حرارة جو أقل من درجة حرارة تكوّن قطرات الندى (**Dewpoint temperature**).

وفي هذا الباب يبقى التساؤول المطروح "كيف يُمكن التأكد من أن المحول وصل إلى مرحلة إستقرار الحرارة قبل البدء بالفحص؟"

كثُرت الأراء والشواهد التي تأكد أن المحول مُستقر حرارياً، فبالرجوع إلى أشهر المعايير العالمية (**Standards**) يُمكن القول أن المحول مُستقر حرارياً فيما إذا تحققت واحدة من الشروط التالية:

- عندما يكون مقدار التغيُّر في درجة حرارة الزيت العُلوي (**Top Oil Temperature**) أقل من درجتين مئويتين لكل ساعة من الزمن حسب معايير (**Standards**) معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].
- مرور قُرابة الثلاث ساعات على عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**)، وذلك للمحولات التي لا تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران الطبيعي للزيت (**Oil Natural - ON**)، حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].
- مرور قُرابة الساعة على عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**)، وذلك للمحولات التي تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران القَسري للزيت (**Oil Forced – OF**)، مع مراعاة إبقاء المضخة بالعمل بعد عزل المحول كهربائياً إلى وقت بداية الفحص حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].
- عندما يكون مُتوسط درجة حرارة الزيت العُلوي (**Top Oil Temperature**) و السُفلي (**Bottom Oil Temperature**) مساوٍ بشكل تقريبي لدرجة حرارة الملفات (**Winding Temperature**) حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [**IEC 60076-1 2011**].
- عندما يكون الفرق في درجة الحرارة بين زيت المحول العُلوي (**Top Oil Temperature**) و السُفلي (**Bottom Oil Temperature**) لا يزيد عن (**5°**) درجات مئوية حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].

4.2 تسجيل درجة الحرارة

يجب تسجيل درجة حرارة الجو المحيط (**Ambient Temperature**) وكذلك درجة حرارة الملفات (**Winding Temperature**) قبل البدء بالفحص وذلك بأخذ قيمة درجة حرارة الملفات عبر مؤشر درجة الحرارة الخاص بالملفات (**Winding Temperature Gauge**) و المُثبت على جانب المحول في لوحة التحكم الخاصة بالمحول، وفي حال تَعذُّر أخذها فإنه يتم إعتماد متوسط درجة حرارة الزيت الخاص بالمحول عبر مؤشرات درجة حرارة الزيت كَكُل أو العُلوي و السُفلي إن وجدت (**Top/Bottom Oil Temperature Gauges**).

4.3 فصل متحسسات الحرارة من النوع (P100) إن وجدت

في حال إستخدام متحسس حرارة من النوع المادي (**PT100**)، فإنه يُفضّل فصل أطراف هذه المتحسسات وعمل دائرة قِصَر لهذه الأطراف (**Short circuit**) ومن ثم وصلها بالأرضي وذلك للحفاظ عليها من أية أضرار قد تلحق بها بسبب هذا الفحص.

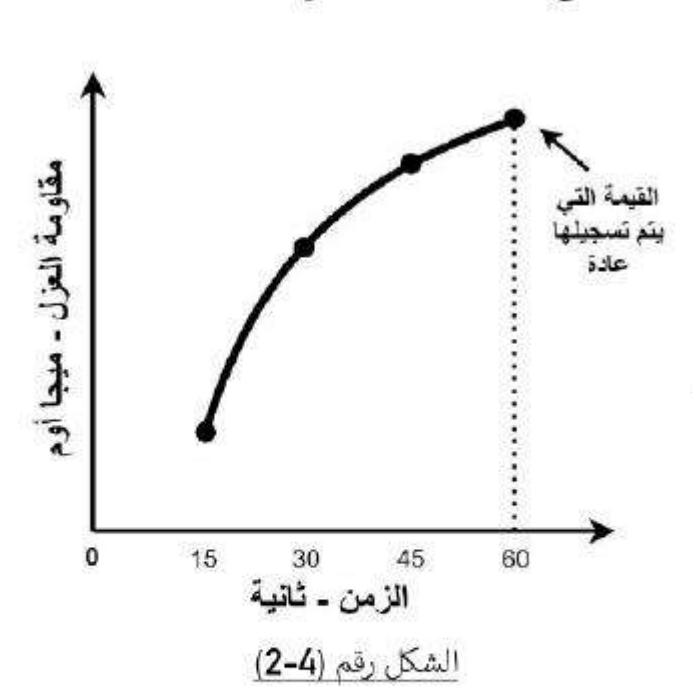
5. أساليب الفحص

توجد عدة أساليب يُمكن إتباعها عند القيام في هذا الفحص فمنها ما يَكتفي بتطبيق فولتية الفحص لزمن قصير وقياس مقاومة العزل كأسلوب قراءات الزمن القصير أو كما يُسمى (**Spot Test**)، ومنها ما يقوم بإيجاد العلاقة بين مقاومة العزل والزمن مثل مؤشر الإمتصاص (**Absorption Index -AI**) و مؤشر الإستقطاب (**Polarization Index – PI**)، ومنها ما يقوم بإيجاد العلاقة بين مقاومة العزل والفولتية مثل أسلوب التدرج بالفولتية (**Step-voltage Test - SV**) و (**Ramp-voltage Test**)، ومنها ما يقوم بتتبع سلوك المادة العازلة بعد زوال الفولتية المُطبقة عليها مثل أسلوب تفريغ العازل (**Dielectric Discharge – DD**). ويتم إختيار أسلوب الفحص المناسب وفقاً لطبيعة المُعدّة المُراد فحصها وطبيعة الفحص فيما إذا كان روتيني أو تشخيصي يهدف لكشف الأعطال بالإضافة إلى نوع العُطل المتوقع، و تتلخص هذه الأساليب بالآتي:

5.1 الأسلوب الأول: قراءات الزمن القصير - Short Time Readings

أو ما يُسمى بال(**Spot Test**)، حيث يُعتبر الفحص بهذا الأسلوب الأسهل والأبسط ويَعتمد على قياس قيمة مقاومة العزل لمدة قصيرة من الزمن عادةً من (**30s – 60s**) ثانية فقط، حيث يتم مُراقبة منحنى القِيَم المُقاسة مع الزمن وتسجيل قيمة مقاومة العزل عند (**60s**) ثانية مع مراعاة تسجيل قيمة درجة الحرارة، كما ويُنصح بتسجيل قيمة المقاومة عند (**15s, 30s, 45s & 60s**) وذلك لرسم منحنى تغيُّر المقاومة مع الزمن وملاحظة إرتفاع قيمة هذه المقاومة مع الزمن، كما هو مُبين في الشكل (**4-2**).

وهذا الأسلوب يُعطي حالة العزل بشكل تقديري وغير دقيق وذلك لكثرة العوامل التي تؤثر عليه مثل درجة الحرارة - علاقة عكسية - والرُطوبة ومِقدار فولتية الفحص وكذلك حجم المحول، لكنه من ناحية أخرى مُفيد كمؤشر على سلامة العازل خاصة بعد مقارنة القيم المُقاسة الحالية بالقِيَم السابقة أو المَرجعيّة مع مراعاة تصحيح القِيَم المُقاسة إلى درجة حرارة (**20°**) درجة مئوية وكذلك أخذ رُطوبة الجو النِسبية بعين الإعتبار.



الشكل رقم (**4-2**)

في حال إجراء الفحص بهذا الأسلوب وتم الحصول على قيمة مُتدنيّة بعد تصحيحها ومقارنتها بقِيَم سابقة فإن هذا يَعني وجود رطوبة وشوائب بالمادة العازلة أما في حال ملاحظة تدني شديد بقيمة المقاومة فهذا يعني فشل العازل كإنطباع أولي، لذلك ولأن المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى لا يجب الإعتماد على أسلوب ال(**Spot Test**) فقط بل يُنصح بإجراء الفحص بأسلوب

مؤشر الإستقطاب (**Polarization Index – PI**) للتأكد من سلامة العزل، وفي حال الحصول على قيمة مؤشر إستقطاب (**PI**) مُتدنية، يُنصح بعمل فحوصات أخرى سيتم الحديث عنها في نهاية هذا الفصل.

5.2 الأسلوب الثاني: قراءات المقاومة المُرتبطة بالزمن - Time-Resistance Readings DAR or AI :

كما هو معلوم بأن مقاومة العازل الجيد تكون بإرتفاع مُستمر على مدى فترة الفحص، أي بمعنى آخر لو قُمنا برسم قيمة المقاومة مع مرور زمن الفحص سَينتُج منحنى ذو قِيَم مقاومة ترتفع مع الزمن كما هو مُبين بالشكل (**5-2**) وهذا يَدُل على عزل جيد. أما اذا كان المنحنى مُسطحاً – ثابت مع الزمن - فذلك يَدُل على عزل غير جيد نتيجة للتيار المُمتص من العازل (**Absorption current I_A**) والذي يَكون ذو قيمة مرتفعة في بداية الفحص ثم ينخفض الى أدنى قيمه له للعازل الجيد، اما للعازل الرديء فإنه يبقى ذو قيمة مرتفعة طوال فترة الفحص وهذا بدوره يُفسر عدم إرتفاع قيمة المقاومة مع الزمن للعازل الرديء.

لذلك في هذا الأسلوب يتم قسمة قراءة مقاومة العزل عند الثانية (**60s**) من زمن الفحص على قراءة مقاومة العزل عند الثانية (**30s**) من زمن الفحص أو بقسمة قراءة التيار المُتسرب عند الثانية (**30s**) من زمن الفحص على قراءة التيار المُتسرب عند الثانية (**60s**) من زمن الفحص ليُعطي ما يُسمى بمؤشر الإمتصاص (**Absorption Index - AI**) أو كما يُسمى بال(**Dielectric Absorption Ratio - DAR**)، والذي بدوره يُعطي إشارة على تصاعد قيمة مقاومة العازل مع الزمن كما هو مُبين بالمعادلة (**2.3**) حسب المرجع [**Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing**].

$$DAR\ or\ AI = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} = \frac{I_{30s}}{I_{60s}} \tag{2.3}$$

حيث؛

$DAR\ or\ AI$: مؤشر الإمتصاص – **Dielectric Absorption Ratio or Absorption Index**.

R_{60s} : قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**MΩ**).

R_{30s} : قيمة مقاومة العزل عند الثانية (**30s**) من الفحص (**MΩ**).

I_{30s} : قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الثانية (**30s**) من الفحص (**µA**).

I_{60s} : قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**µA**).

وتَجدُر الإشارة إلى أن بعض المراجع التي تعتمد على المعايير الصينية (**Chinese standards**) أوردت نفس المعادلة لحساب مؤشر الإمتصاص (**DAR / AI**) سابقة الذِكر ولكن بقسمة قراءة مقاومة العزل عند الثانية (**60s**) من زمن الفحص على قراءة مقاومة العزل عند الثانية (**15s**) من زمن الفحص عوضاً عن الثانية (**30s**) من زمن الفحص وكلاهما يوفي بالغرض.

5.3 الأسلوب الثالث: قراءات المقاومة المُرتبطة بالزمن - Time-Resistance Readings PI :

يهدف هذا الأسلوب بشكل رئيسي إلى الكشف عن وجود رطوبة في المادة العازلة، حيث أن هذا الأسلوب (**PI**) و الأسلوب السابق (**AI**) يتطابقان في المبدأ إلا أنهما يفترقان في مُدة الفحص، حيث أن هذا الأسلوب تكون مُدته (**10 min**) دقائق ويتم إحتساب قيمة مؤشر الإستقطاب (**Polarization Index – PI**) وذلك بقسمة قراءة مقاومة العازل عند الدقيقة (**10 min**) من زمن الفحص على قراءة مقاومة العازل عند الدقيقة الأولى (**1 min**) من زمن الفحص حسب المعادلة (**2.4**) الواردة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.152-2013**] أو بقسمة قراءة التيار المُتسرب عند الدقيقة الأولى من زمن الفحص (**1 min**) على قراءة التيار المُتسرب عند الدقيقة (**10 min**) من زمن الفحص.

$$PI = \frac{R_{10\,min}}{R_{1\,min}} = \frac{I_{1\,min}}{I_{10\,min}} \qquad (2.4)$$

حيث؛

PI : مؤشر الإستقطاب – **Polarization Index**.

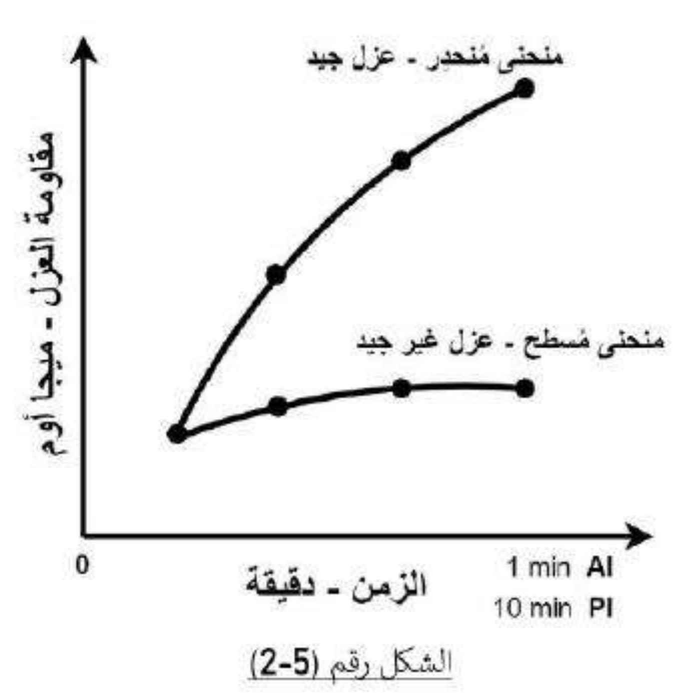
$R_{10\,min}$: قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة العاشرة من الفحص (**MΩ**).

$R_{1\,min}$: قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**MΩ**).

$I_{1\,min}$: قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**µA**).

$I_{10\,min}$: قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة العاشرة من الفحص (**µA**).

كما وتَجدُر الإشارة إلى أنه من مميزات هذا الأسلوب (**PI**) عدم حاجته لِقِيَم فحص سابقة ليتم مقارنتها بها وكذلك لا تؤثر درجة الحرارة والرطوبة على قيمته النهائية، حيث أن درجة الحرارة والرطوبة الجوية عند الدقيقة الأولى هي نفسها عند الدقيقة **10** من الفحص والقيمة المُقاسة (**PI**) هي عبارة عن نسبة (**Ratio**).



الشكل رقم (**2-5**)

ومنه يُمكن ملاحظة أن إجراء هذا الفحص بإستخدام أسلوبي الفحص (**PI** و **AI**) يُمكن من خلاله إستخلاص العلاقة بين مُقاومة العزل (**Insulation Resistance**) والزمن، حيث يُنصح بتسجيل قيمة مقاومة العزل عند إجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (**PI**) كل دقيقة وذلك لرسم منحنى تغيُّر المقاومة مع الزمن وملاحظة إرتفاع قيمة هذه المقاومة مع الزمن، كما هو مبين في الشكل (**2-5**).



ملحوظة (2-2): يتم تطبيق هذا الفحص بإستخدام الأساليب (**PI** و **AI**) للكشف عن جودة المواد العازلة الصلبة (**Solid dielectric**) لذلك لا يُنصح بتطبيقها على المحولات الجديدة المغمورة بالزيت (**New Oil Immersed Transformer**) حسب توصيات معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE C57.152-2013**]، وذلك لتأثير الزيت على قيمة الفحص وهذا لا يَعكس وضع عزل المحول الراهن على النقيض من المولدات والمحركات الكهربائية.

نظراً للتشابه الكبير بين أسلوب الفحص (**AI**) ذو الدقيقة الواحدة و أسلوب الفحص (**PI**) ذو العشر دقائق، يبقى التساؤل المطروح "متى يتم إجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (**AI**) و متى يتم إجراؤه بأسلوب مؤشر الإستقطاب (**PI**)؟"

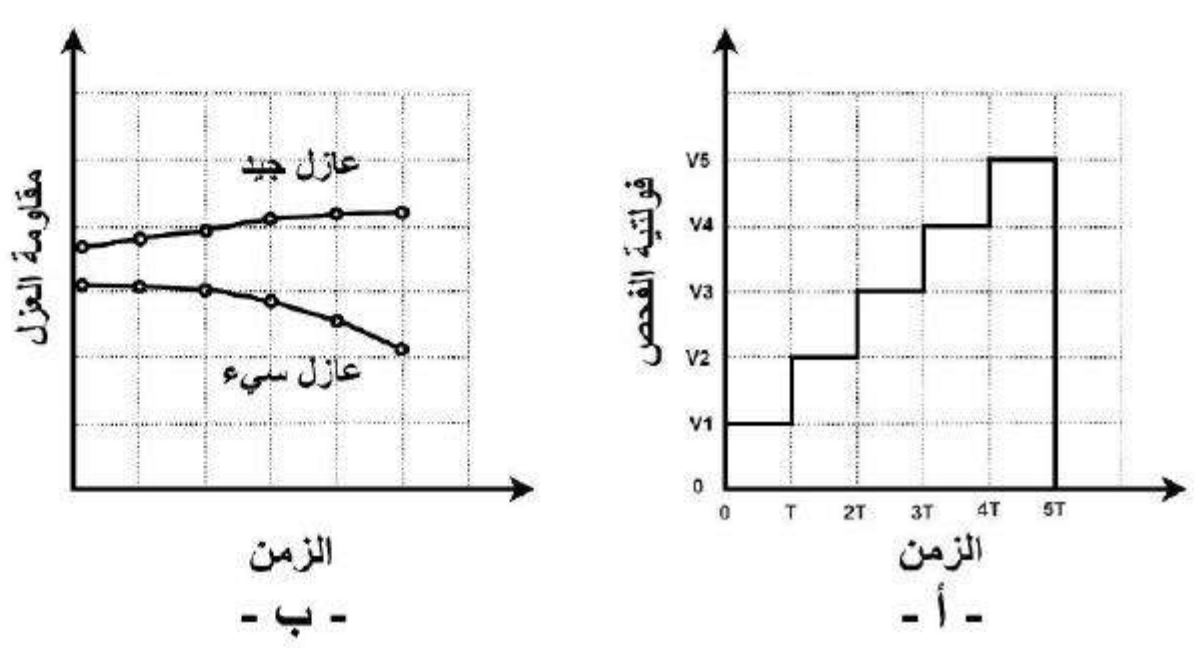
يُعتبر مؤشر الإمتصاص (**AI**) أقل دِقة في الكشف عن حالة المادة العازلة من نظيره مؤشر الإستقطاب (**PI**) نظراً لقِصَر زمن هذا الفحص (**AI**) مقارنة بنظيره (**PI**). لذلك فإن الفحص بهذا الأسلوب (**AI**) يُمكن إجراؤه في الحالات التالية:

- ✓ **ضيق الوقت؛** في حال ضيق الوقت يتم الفحص بالإعتماد على هذا الأسلوب (**AI**) ذو الدقيقة الواحدة كونه أكثر دِقة في الكشف عن حالة العازل من قراءات الزمن القصير أو كما تُسمى بالـ(**Spot Test**).
- ✓ **نوع جهاز الفحص؛** عند إستخدام أجهزة الفحص (**Megohmmeter**) اليدوية (**Hand-driven**) فإنه من الصعب مواصلة تحريك الجهاز يدوياً لمدة عشر دقائق بهدف إستخراج مؤشر الإستقطاب (**PI**)، لذلك يتم الإكتفاء بعمل الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (**AI**).
- ✓ **نوع العازل المُراد فحصه؛** في حال كانت المادة العازلة ذات تيار إمتصاص (**Absorption Current**) يتناقص بشكل سريع، فإن ذلك يزيد من نجاعة الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (**AI**). ومن الجدير بالذِكر أنه لهذا النوع من المواد العازل عادة ما يكون قياس مؤشر الإمتصاص (**AI**) أكثر دِقة منه لمؤشر الإستقطاب (**PI**)، وذلك لثبات قيمة مقاومة العزل قبل الوصول لدقيقة من زمن الفحص مما يعني أن مقاومة العزل عند دقيقة ستكون مساوية تقريباً لمقاومة العزل عند عشر دقائق وهذا سَيُعطي قيمة مؤشر إستقطاب (**PI**) مساوٍ للـ(1) مما لا يعكس حالة العزل الحقيقية للمادة.

لذلك عادةً ما يتم الإكتفاء بإجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (**PI**) عِوضاً عن مؤشر الإمتصاص (**AI**).

5.4 الأسلوب الرابع: قراءات المقاومة المُرتبطة بالفولتية – Step-voltage Readings :SV

وأيضاً يُسمى بفحص التَدرُّج بالفولتية (**DC Voltage Tip-Up Test**)، عادة ما يتم الكشف عن تلوث المادة العازلة بالغبار وغيره من الملوثات كالرطوبة عبر أساليب الفحص المُرتبطة بالزمن مثل مؤشر الإمتصاص والإستقطاب (**PI** و **AI**) سابقي الذِكر، أما في هذا الأسلوب فإنه يكشف عن عُيوب المادة العازلة التي تظهر مع إرتفاع فولتية الفحص مثل وجود أضرار موضعيّة كالثقوب أو غيرها من الأضرار الفيزيائية بالإضافة إلى الكشف عن العازل المُتقادم بالرغم من نظافة هذا العازلة وخلوه من الرطوبة، حيث يتم في هذا الأسلوب تطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) بشكل مُتدرّج على المادة العازلة حتى الوصول إلى الفولتية الكاملة للفحص ومُراقبة قيمة مقاومة العزل عند كل مرحلة كما هو مبين في الشكل [**(2-6)** (أ)]، وكما هو معلوم أن العزل الجيد يُمكن التعبير عنه بمقاومة لذلك عند إرتفاع فولتية الفحص المُطبقة على العازل لا بُد من إرتفاع قيمة التيار التسرُبي وذلك للحفاظ على قيمة مقاومة العازل ثابته، و في حال ظهور أي خلل بين قيمة إرتفاع الفولتية والتيار أثناء الفحص فإن هذا يدُل على وجود مُشكلة في هذا العازل [**(2-6)** (ب)]. ومن هذا الأسلوب يُمكن إستخلاص العلاقة بين مقاومة العزل (**Insulation Resistance**) والفولتية.



الشكل رقم **(2-6)**

و لفهم أكثر لهذا الإسلوب سَنفرض أننا قُمنا بتطبيق فولتية مقدارها (**500V**) فولت على مادة عازلة بهدف قياس مقاومة العزل لهذه المادة، من المُرجح في هذه الحالة الحصول على قيمة مقاومة عزل جيدة بالرغم من وجود فجوات داخل هذه المادة لم نتمكن من الكشف عنها، إلا أنه بعد زيادة فولتية الفحص المُطبقة مثلاً إلى (**1000V**) فولت يحدث تآين (**Ionization**) للفجوات داخل هذه المادة العازلة مما يَزيد من قيمة التيار التسرُبي ويُقلل من قيمة مقاومة العزل ويتيح لنا الكشف عن هذه الفجوات في المادة العازلة.



ملحوظة (3-2): عادة يتم التدرُّج في رفع قيمة الفولتية بحيث يكون زمن الخطوة متساوي لجميع الخطوات، فمثلاً لو أردنا عمل على الفحص على مدة خمس دقائق نقوم برفع مستوى الفولتية كل دقيقة من الزمن.



ملحوظة (4-2): يُنصح في بعض الأحيان أن لا تتجاوز قيمة فولتية الفحص بإستخدام هذا الأسلوب أكثر من **60%** من الـ(**Withstanding voltage**) للمحول، وكذلك أن لا تتجاوز الفولتية الإسمية للملفات حتى لا تُلحق أية أضرار بمنظومة العزل.



ملحوظة (5-2): يُنصح بإجراء هذا الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (**PI**) قبل القيام بهذا الأسلوب للتأكد من من أن العازل قادر على تحمل الفولتية المرتفعة المُطبقة في هذا الأسلوب.

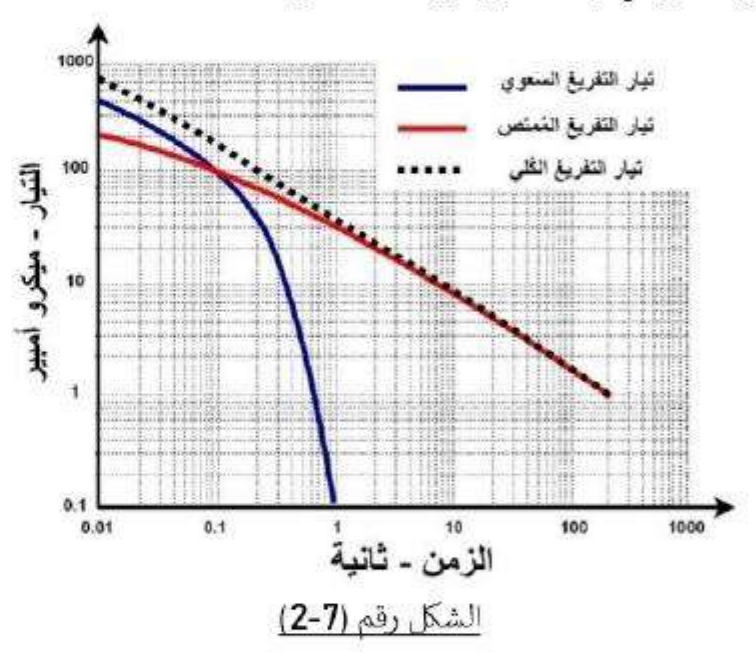
5.5 الأسلوب الخامس: قراءات تيار تفريغ العازل - Re-absorption Current or Dielectric Discharge DD :

كما تم شرحه سابقاً في فلسفة الفحص فإنه عند تطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) على العازل تنشأ عدة تيارات منها ما هو سَعوي لشحن مواسعة العازل (I_C) ومنها ما يتم إمتصاصه من قبل العازل لترتيب جزيئاته الداخلية (I_A) ومنها ما يتسرب من خلال المادة العازلة وعلى سطحها على شكل تيار مادي (I_L و I_S).

ولكن بعد زوال تأثير الفولتية الثابتة (**DC Voltage**) المُطبقة على المادة العازلة (وهو ما يتم عمله في هذا الأسلوب) فإن التيارات المادية المُتسربة من خلال العازل وعلى سطحه (I_L و I_S) تصبح قيمتهما قُرابة الصفر في وقت قليل جداً لذلك سيتم إهمالهما في هذا الأسلوب، أما فيما يَخص التيار السَعوي (I_C) فإنه سوف ينخفض إلى قُرابة الصفر في عدة ثواني أي حتى تقوم مواسعة العازل بالتفريغ، وكذلك الحال فيما يَخُص التيار المُمتص (I_A) أو كما يُسمى بالـ(**Re-absorption Current**) في حالتنا هذه (حالة التفريغ) ولكنه يحتاج إلى زمن أكبر من التيار السَعوي حتى يصل إلى أدنى قيمة له فقد يستغرق قرابة الدقيقة أو الدقيقتين، حيث ينشأ هذا التيار (**Re-absorption Current**) نتيجة لرجوع أغلب الجزيئات الخاصة بالمادة العازلة إلى ترتيبها السابق – العشوائي – أي قبل تعرضها للفولتية الثابتة (**DC Voltage**).

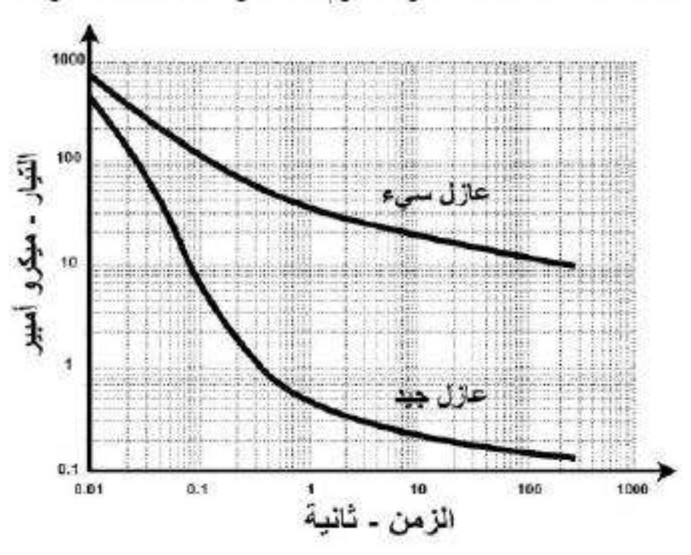
و إنطلاقاً مما تم شرحه يمكن ملاحظة أن تيارات التفريغ (**Discharge Currents**) التي تلي تَعرّض المادة العازل إلى فولتية ثابتة ومن ثم زوالها، تنحصر بالتيار السَعوي (I_C) و التيار المُمتص (I_A) أو كما يُسمى بالـ(**Re-absorption Current**) في حالة التفريغ، وبناءاً عليه تم الإستفادة من هذا التيار الـ(**-Re**

absorption Current) في الكشف عن حالة هذه المادة العازلة، فإذا كان هذا التيار ذو قيمة مرتفعة فإنه يدل على عازل ملوث بالرطوبة أو غيرها من الشوائب. والشكل (**2-7**) يوضح تيارات التفريغ التي تظهر مباشرة بعد زوال تأثير فولتية الفحص عن المادة العازلة.



الشكل رقم (**2-7**)

وهذا الأسلوب (**Dielectric Discharge – DD**) يَهدف للكشف عن تقادم وتدهور المادة العازلة وكذلك وجود رطوبة أو فجوات هوائية (**Voids**) داخل المادة العازلة بالإعتماد على ظاهرة تيارات التفريغ سابقة الذكر، وعادةً ما يُستخدم هذا الأسلوب في فحص العوازل المُكوَّنة من عدة طبقات (**Multilayer**) حيث يُمكّن من الكشف عن إنهيار طبقة أو مجموعة من الطبقات (**Layers**) والتي قد يَتعذّر كشفها بإستخدام أساليب الفحص السابقة، حيث وكما هو معلوم أن عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (**HV bushings**) عادةً ما تتكون من عدة طبقات (**Layers**) من شأنها تقليل الإجهاد الناتج عن الفولتية وتجزئتها وتكون لكل من هذه الطبقات (**Layers**) مواسعتها الخاصة وتيار تسرُب مادي خاص بها، وعند فشل واحدة من هذه الطبقات فإن قيمة المواسعة الكلية قد لا تختلف ولكن تيار التسرُبي المادي الخاص بهذه الطبقة سوف يزداد على النظير من ظاهرة زيادة التيار المُمتص سابقة الذِكر (**Re-absorption current**) مما يَدُل على وجود فشل في إحدى الطبقات و يجعل هذا الأسلوب (**DD**) الأكثر نجاعة في الكشف عن وجود فشل في هذه الطبقات من العزل.



الشكل رقم (**2-8**)

يوضح الشكل (8-2) السابق تيار التفريغ الكُلي للمادة العازلة والذي يتناسب عكسياً مع جودة المادة العازلة.

حالياً تقوم العديد من أجهزة الفحص بعمل فحص مقاومة العازل وفقاً لهذا الأسلوب (DD) تلقائياً دون الحاجة إلى تجهيزات خاصة، فعند إختيار هذا الأسلوب يقوم جهاز الفحص بتطبيق فولتية ثابتة (DC voltage) على العازل لمدة طويلة قرابة الـ(30 minutes) وذلك للتأكد من أن العازل قد تم شحنه تماماً أي أن تيار الشحن السَعوي في أدنى قيمة له وكذلك إنتهاء إستقطاب جزيئات المادة العازلة أي أن التيار المُمتص (Absorption current) في أدنى قيمة له، وبعد ذلك يتم إزلة الفولتية المُطبقة على العازل وقياس تيار التفريغ لمدة دقيقة ومن ثم يتم حساب قيمة (Dielectric Discharge DD) وفقاً للمعادلة (2.5) الواردة في الكُتيّب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص المُصنَّع من قِبَل شركة (MEGGER).

$$Dielectric\ Discharge\ DD = \frac{I_{1min}}{V.C} \qquad (2.5)$$

حيث:

I_{1min} : تيار التفريغ لمدة دقيقة بالملي أمبير (mA)

V : فولتية الفحص بالفولت (V)

C : قيمة مواسعة العازل بالفاراد (Farad)



ملحوظة (6-2): هذا الأسلوب من الفحص (Dielectric Discharge - DD) لا يتأثر بمقدار تيار التسرُب السطحي للعوازل وكذلك فولتية الفحص، ولكنه يتأثر بالحرارة لذلك يجب تسجيلها أثناء الفحص.

6. توصيلة الفحص

تختلف توصيلة الفحص وفقاً لإختلاف نوع المُعدَّة (Equipment) أو الجزء من المُعدَّة (Part) المُراد فحصه فيما إذا كان محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Two Windings) أو ثلاثي الملفات (Tertiary Windings) أو عوازل إختراق (Bushings) أو قلب حديدي لمحول (Core) أو دعائم تثبيت القلب (Core Clamp) وذلك لإختلاف منظومة العزل لكل منها كالآتي:

6.1 ملفات المحول - Transformer Windings

عند إجراء هذا الفحص على ملفات المحول لا بُد من معرفة نوع المحول فيما إذا كان ثنائي الملفات (Two Windings) أو ثلاثي الملفات (Tertiary Windings)، حيث تختلف توصيلة الفحص وفقاً لنوع هذا المحول لتكون كالآتي:

- **المحولات ثلاثية الأطوار ثنائية الملفات - Three Phase Two Windings**

تكون أنماط الفحص لهذا النوع من المحولات وفقاً للجدول (**2-2**) والأشكال التالية توضح التوصيلة لكل نمط:

الجدول رقم (**2-2**)

الرقم	أطراف القياس	الرقم	أطراف القياس
1	HV – LVG	4	LV – HVG
2	HV – G	5	LV – G
3	HV – LV		

حيث؛

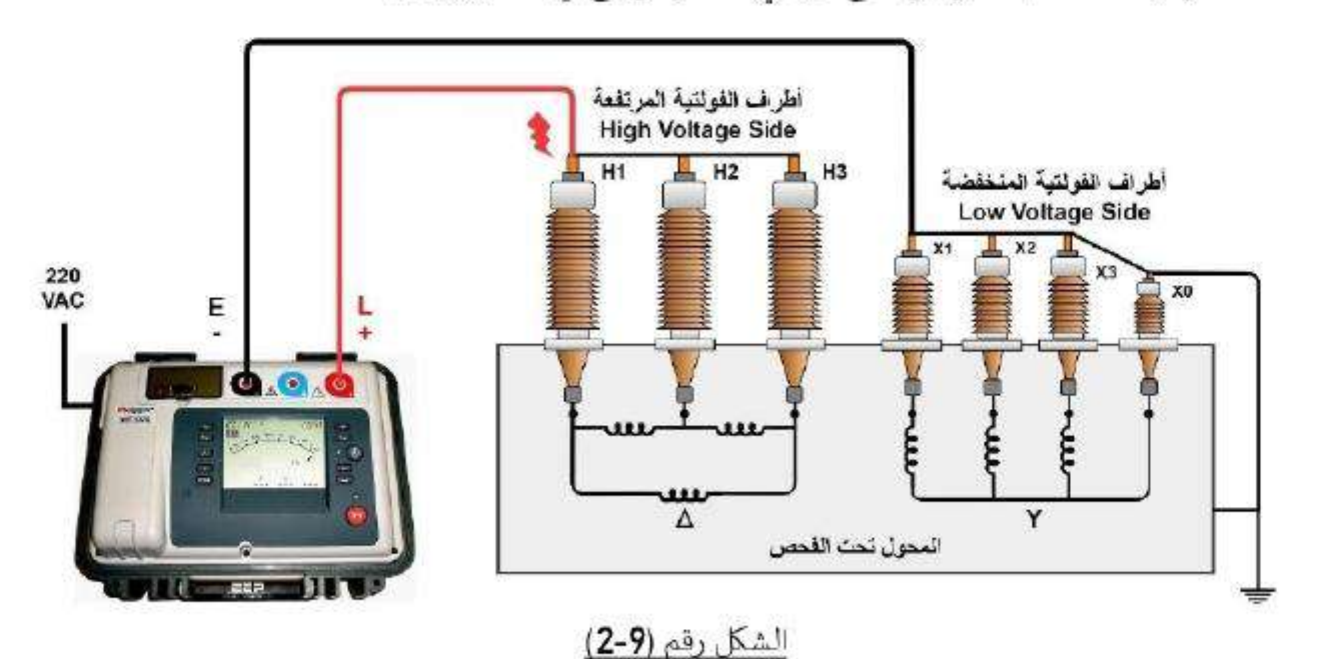
HV : ملفات الفولتية المرتفعة.

LV : ملفات الفولتية المنخفضة.

G : الأرضي (جسم المحول).

- **الفحص بين ملفات الفولتية المرتفعة من جهة وملفات الفولتية المنخفضة والأرضي من جهة أخرى (HV to LVG):**

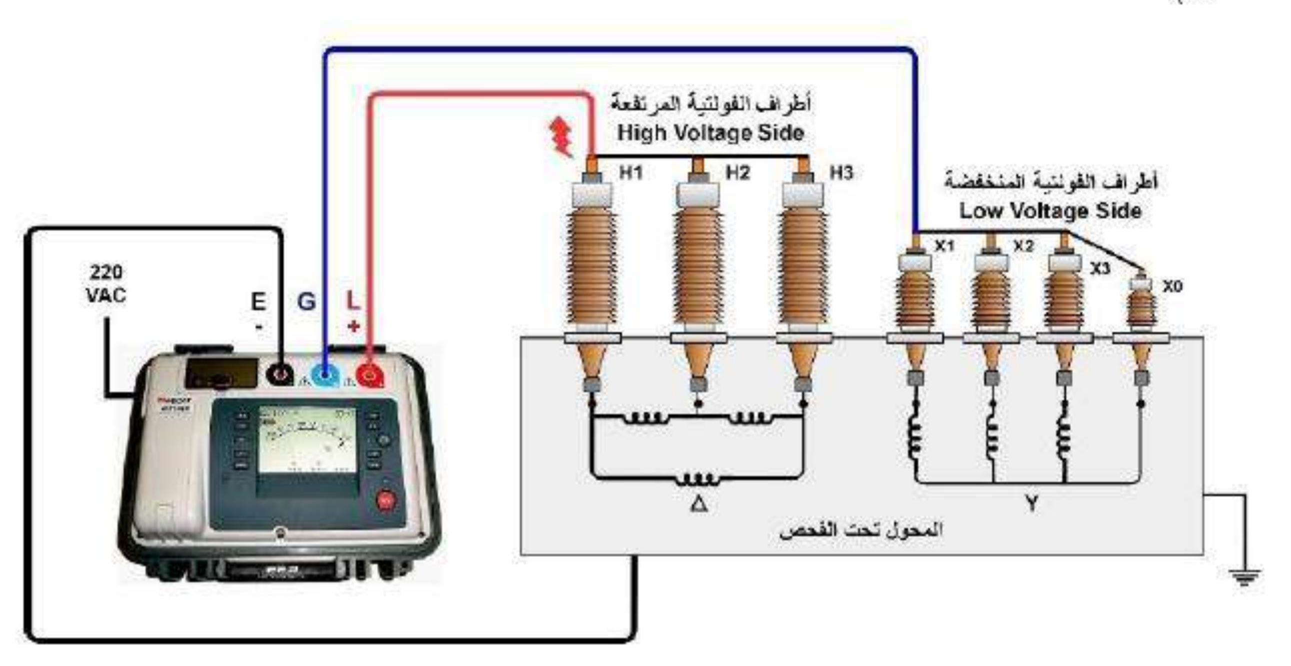
حيثُ يتم قصر (**Short circuit**) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (**H1** و **H2** و **H3** و **H0** إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قَصر (**SC**) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (**X1** و **X2** و **X3** و **X0** إن وجد) مع بعضها ومع الأرضي، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (**L**) أو (**+**) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (**E**) أو (**-**) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة الموصولة مع الأرضي كما هو موضح في الشكل (**2-9**).



الشكل رقم (**2-9**)

- الفحص بين ملفات الفولتية المرتفعة من جهة و الأرضي من جهة أخرى مع إزالة تأثير ملفات الفولتية المنخفضة (HV to G):

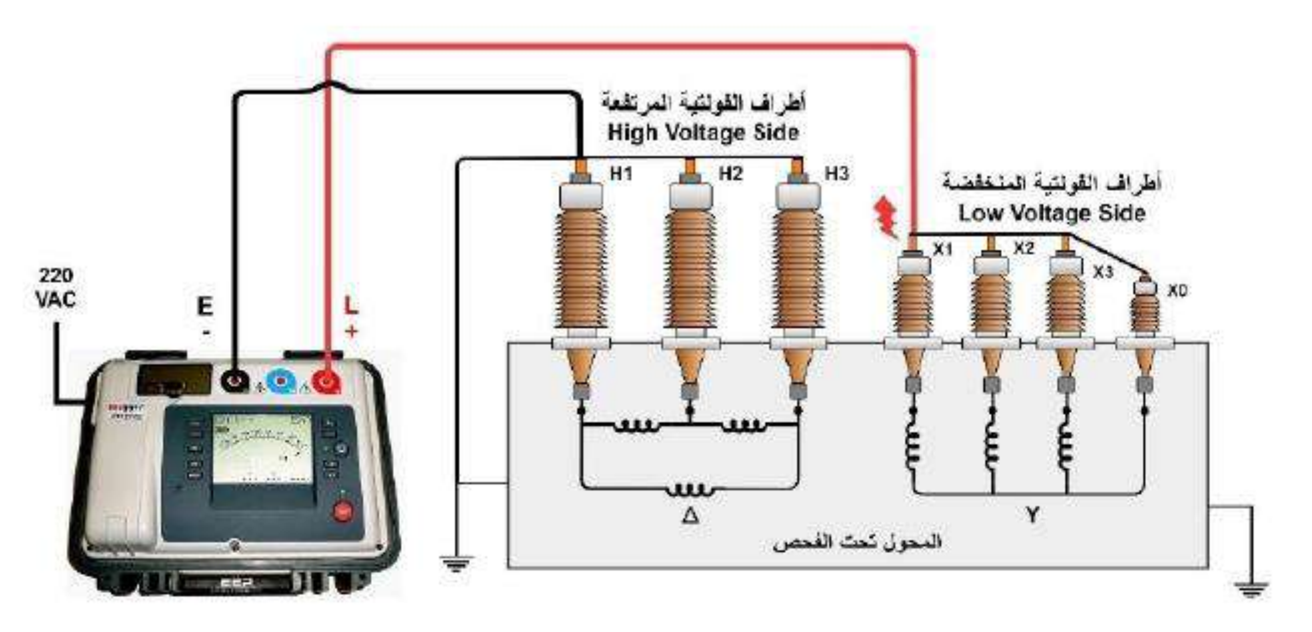
حيث يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (H1 و H2 و H3 و H0 إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (X1 و X2 و X3 و X0 إن وجد) مع بعضها، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (L) (+) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بجسم المحول (الأرضي) مع مراعاة توصيل طرف جهاز الفحص (G) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة كما هو موضح في الشكل (2-10).



الشكل رقم (2-10)

- الفحص بين ملفات الفولتية المنخفضة من جهة وملفات الفولتية المرتفعة والأرضي من جهة أخرى (LV to HVG):

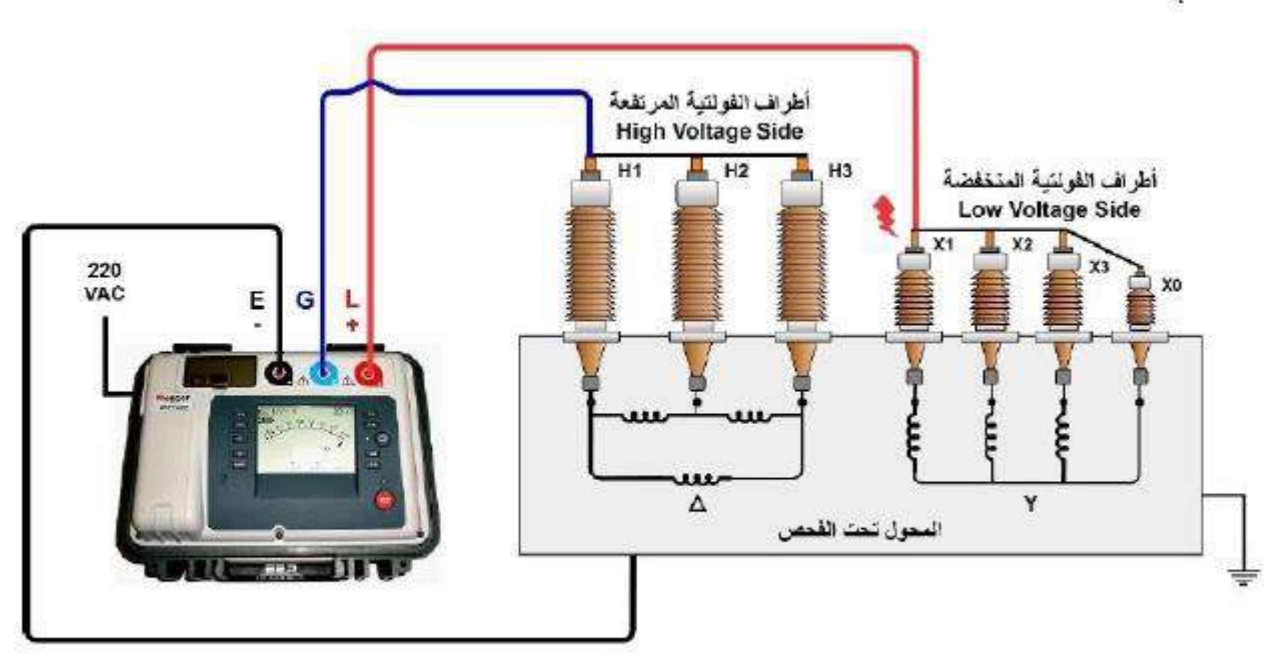
حيث يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (X1 و X2 و X3 و X0 إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قصر (SC) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (H1 و H2 و H3 و H0 إن وجد) مع بعضها ومع الأرضي، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (L) (+) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (E) (-) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة الموصولة مع الأرضي كما هو موضح في الشكل (2-11).



الشكل رقم (2-11)

- **الفحص بين ملفات الفولتية المنخفضة من جهة و الأرضي من جهة أخرى مع إزالة تأثير ملفات الفولتية المرتفعة (LV to G):**

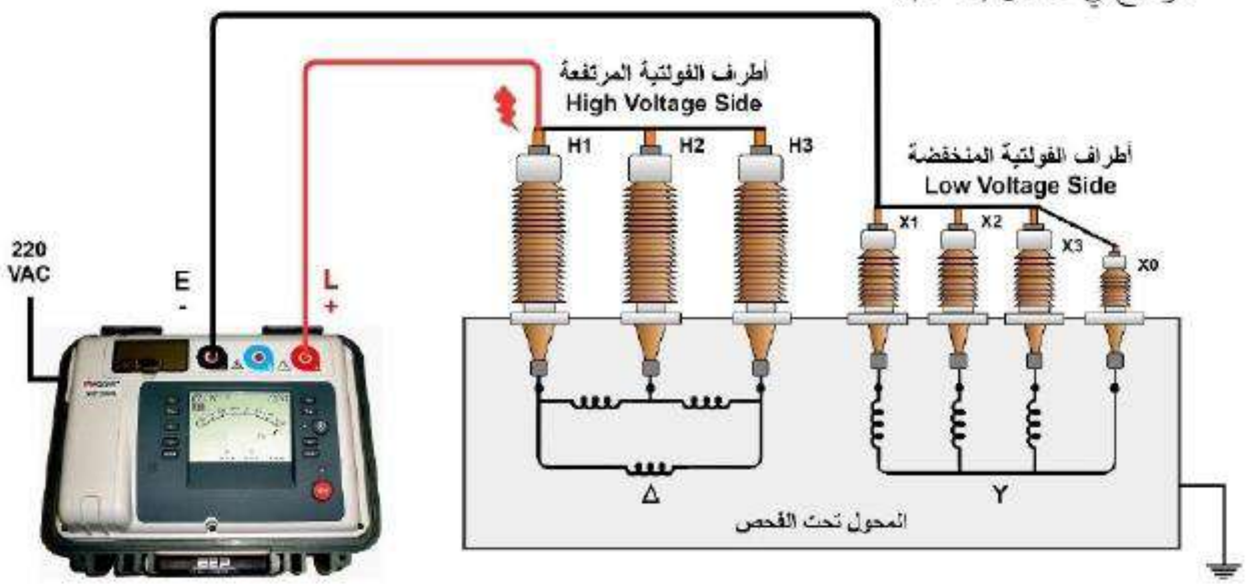
حيث يتم قَصر (**SC**) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (**X1** و **X2** و **X3** و **X0** إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قَصر (**SC**) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (**H1** و **H2** و **H3** و **H0** إن وجد) مع بعضها، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (**L**) (**+**) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (**E**) (**-**) بجسم المحول (الأرضي) مع مراعاة توصيل طرف جهاز الفحص (**G**) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة كما هو موضح في الشكل (**2-12**).



الشكل رقم (2-12)

- **الفحص بين ملفات الفولتية المرتفعة من جهة وملفات الفولتية المنخفضة من جهة أخرى (HV to LV):**

حيث يتم قصر(**SC**) أطراف أطوار ملفات الفولتية المرتفعة (**H1** و **H2** و **H3** و **H0** إن وجد) مع بعضها وكذلك يتم قصر(**SC**) أطراف أطوار ملفات الفولتية المنخفضة (**X1** و **X2** و **X3** و **X0** إن وجد) مع بعضها، ثم يتم توصيل طرف جهاز الفحص الموجب (**L**) (**+**) بأطراف ملفات الفولتية المرتفعة و توصيل طرف جهاز الفحص السالب (**E**) (**-**) بأطراف ملفات الفولتية المنخفضة كما هو موضح في الشكل (**2-13**).



الشكل رقم (**2-13**)

- **المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات - Three Phase Tertiary Windings**

تكون أنماط الفحص لهذا النوع من المحولات وفقاً للجدول (**2-3**) التالي:

الجدول رقم (**2-3**)

الرقم	أطراف القياس	الرقم	أطراف القياس
1	HV – LVTVG	5	HVLV – TVG
2	LV – HVTVG	6	HVTV – LVG
3	TV – HVLVG	7	LVTV - HVG
4	HVLVTV – G		

حيث؛

HV : ملفات الفولتية المرتفعة.

LV : ملفات الفولتية المنخفضة رقم (**1**).

TV : ملفات الفولتية المنخفضة رقم (**2**).

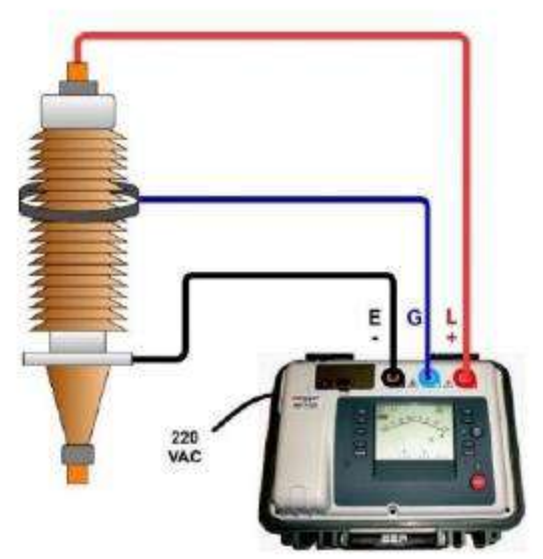
G : الأرضي (جسم المحول).



ملحوظة (7-2): الفحوصات بإتباع الأنماط سابقة الذِكر تقيس مقاومة العزل للملفات وعوازل الإختراق معاً **(Transformer Bushings)**.

6.2 عوازل الأختراق أو الجُلَب – Bushings

في حال كانت عوازل الإختراق مُنفصلة عن المحول (قبل تركيبها) وكما هو الحل بالنسبة لملفات المحول فإن هذا الفحص يُمكن تطبيقه على هذا النوع من العوازل **(Transformer Bushings)** وذلك للكشف عن حالة نظام العزل الخاص بها، ويتم توصيل جهاز الفحص مع عازل الإختراق كما هو موضح في الشكل **(2-14)**.



الشكل رقم **(2-14)**

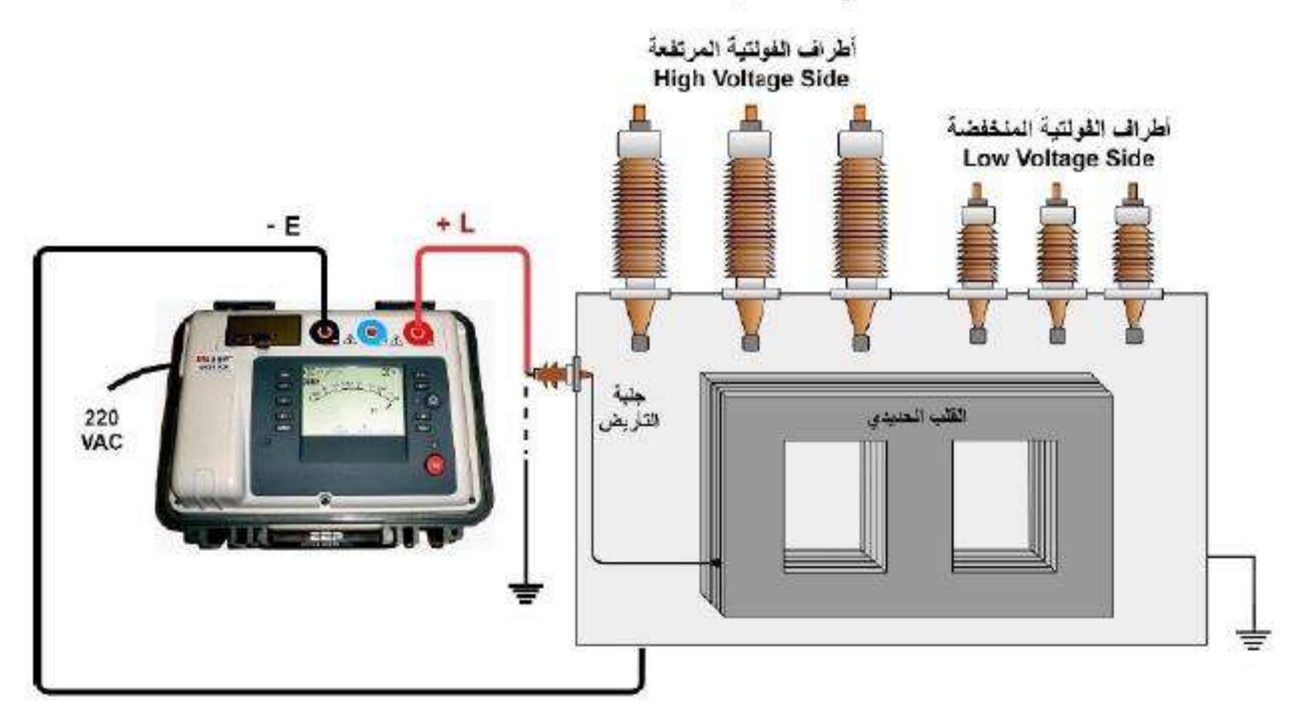
6.3 القلب الحديدي – Iron Core

كما تم شرحه في الفصل الأول فإن القلب الحديدي للمحول يكون موصول بالأرض من خلال عازل إختراق أو كما تُسمى جُلبة التأريض **(Core Grounding Bushing)** وذلك للتخلّص الفولتيات غير المرغوب بها والتي تنشأ بين مجموعات الصفائح لهذا القلب، بحيث يتم تأريضه من نقطة واحدة فقط بموصل نحاسي لتجنب حدوث تيارات دوّارة **(Circulating currents)** بالإضافة إلى تأمين ممر لتيارات العُطل الخاصة بالقلب أو ما يُسمى بالـ**(Electrical Fault path)** للرجوع لمصدرها منعاً لظهور الفولتيات المرتفعة المصاحبة للتيارات العطل مما قد يؤذي المواد العزلة الخاصة بهذا القلب، لذلك يُنصح بعمل هذا الفحص للقلب الحديدي بشكل روتيني خلال فترة توقف المحول أثناء الصيانة الشاملة **(Major Inspection)** وبعد فترة قصيرة من كهربة المحول **(Transformer energization)** للمرة الأولى بالموقع وكذلك بعد عمليات الصيانة أو التعديل التي من شأنها التأثير على نظام العزل الخاص بهذا القلب، أما بشكل تشخيصي فإنه يُنصح بعمل هذا الفحص في حال إرتفاع درجة حرارة المحول أو ظهور بعض الغازات بالزيت وخاصة غازات إحماء المعدن سابقة الذِكر فإنه قد يَكون السبب فشل في نظام العزل الخاص بالقلب الحديدي للمحول مما يؤدي لوجود نقطة أو نقاط تأريض للقلب

الحديدي من أكثر من مكان غير المكان المخصص لذلك (عبر جُلبة التأريض) مُسبباً تيارات دَوّارة (Circulating currents) من شأنها رفع درجة حرارة المحول.

وعادةً ما يتم إجراء هذا الفحص بين القلب الحديدي من جهة والأرضي من جهة أخرى (Core to Ground) وذلك للتأكد من سلامة نظام العزل الرئيسي الخاص بهذا القلب، و أيضاً يُمكن إجراء هذا الفحص بين القلب الحديدي من جهة ودعائم تثبيت القلب والأرضي من جهة أخرى (Core to Core (Clamp + Ground.

الشكل (**2-15**) يوضح توصيلة الفحص الخاصة بالقلب الحديدي (**Core to Ground**)، بحيث يتم فصل كيبل التأريض عن عازل الإختراق أو كما يُسمى جُلبة التأريض (**Grounding Bushing**) و من ثم وَصل طرف جهاز الفحص الموجب (**L**) (**+**) مع طرف عازل إختراق أو كما تُسمى جُلبة التأريض (**Grounding Bushing**) الخاصة بالقلب الحديدي (بعد فصل الجُلبة عن الأرضي)، ويتم وصل طرف جهاز الفحص السالب (**E**) (-) بالأرضي أو جسم المحول.



الشكل رقم (**2-15**)

في حال تبين عطل في عزل القلب (وجود نقاط تأريض أخرى للقلب الحديدي غير النقطة المخصصة لذلك) وبعد مراسلة الشركة المُصنعة لهذا المحول (**OEM**) يُمكن القيام بأحد الإجراءات التصحيحية التالية:

- ✓ إضافة مقاومة مقدارها بضع كيلو أوم على الخط الواصل بين القلب الحديدي والأرض والتي من شأنها الحد من التيارات الدوّارة في حاول تكونها. حيث أن هذا الإجراء لا يقوم بإزالة المشكلة من الأساس و إنما يخفف من تأثيرها حسب ما وَرَدَ في معايير مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.152-2013].

- ✓ يتم الطَرق على خزان المحول مما يولد إهتزازات من شأنها إزالة نقطة التأريض غير المرغوب بها حسب ما ورد في **[Air Force Handbook, Field Guide for Inspection, Evaluation, and Maintenance Criteria for Electrical Transformers 32-1282V2]**، و تُعد هذه الطريقة من الطُرق القديمة والتي لا يُنصح بها البتة.
- ✓ إستخدام طريقة الحرق (**Burn off**)، وذلك بحقن تيار ثابت أو متردد في القلب مع مراعاة أن لا يتجاوز قيمة معينة مثل **40** أو **50** أمبير بشكل مُتدرّج حسب ما وَرَدَ في **[Bureau of Reclamation, Transformer Maintenance FIST 3-30]**، حيث يقوم هذا التيار بحرق وإزالة نقطة التأريض غير المرغوب بها. و تُعد هذه الطريقة من الطُرق القديمة ففي بعض الأحيان تنجح في حل المشكلة و في أحيان أخرى لا تنجح وقد تتسبب بزيادة المشكلة، لذلك يجب التواصل مع مُصنّع المحول (**OEM**) قبل إستخدام هذه الطريقة.

كما وتَجدُر الإشارة إلى أن مشكلة ظهور نقاط تأريض متعددة للقلب الحديدي تكون ذات تأثير كبير على القلب الحديدي ثلاثي الأعمدة أو ما يُسمى بالـ(**Core Type**)، أما للقلب الحديدي من النوع خماسي الأعمدة أو كما يُسمى بالـ(**Shell Type**) فإن هذه المشكلة في القلب لا تُعتبر ذات أهمية كبيرة **[Air Force Handbook, Field Guide for Inspection, Evaluation, and Maintenance Criteria for Electrical Transformers 32-1282V2]**.



ملحوظة (8-2): المحولات ثلاثية الطور ذات القلب الحديدي من النوع خماسي الأعمدة أو كما يُسمى بالـ(**Shell Type**) والمُصنَّعة قبل العام (**1997**) لا تحتوي على عازل إختراق تأريض ظاهر (**Grounding Bushing**) يُمكن الوصول إليه بسهولة، لذلك قد يتعذر القيام بهذا الفحص. في هذه الحالة يجب التواصل مع المُصنع في حال وجود دلائل تُشير على وجود عطل في هذا القلب الحديدي **[IEEE Std C57.152-2013]**.



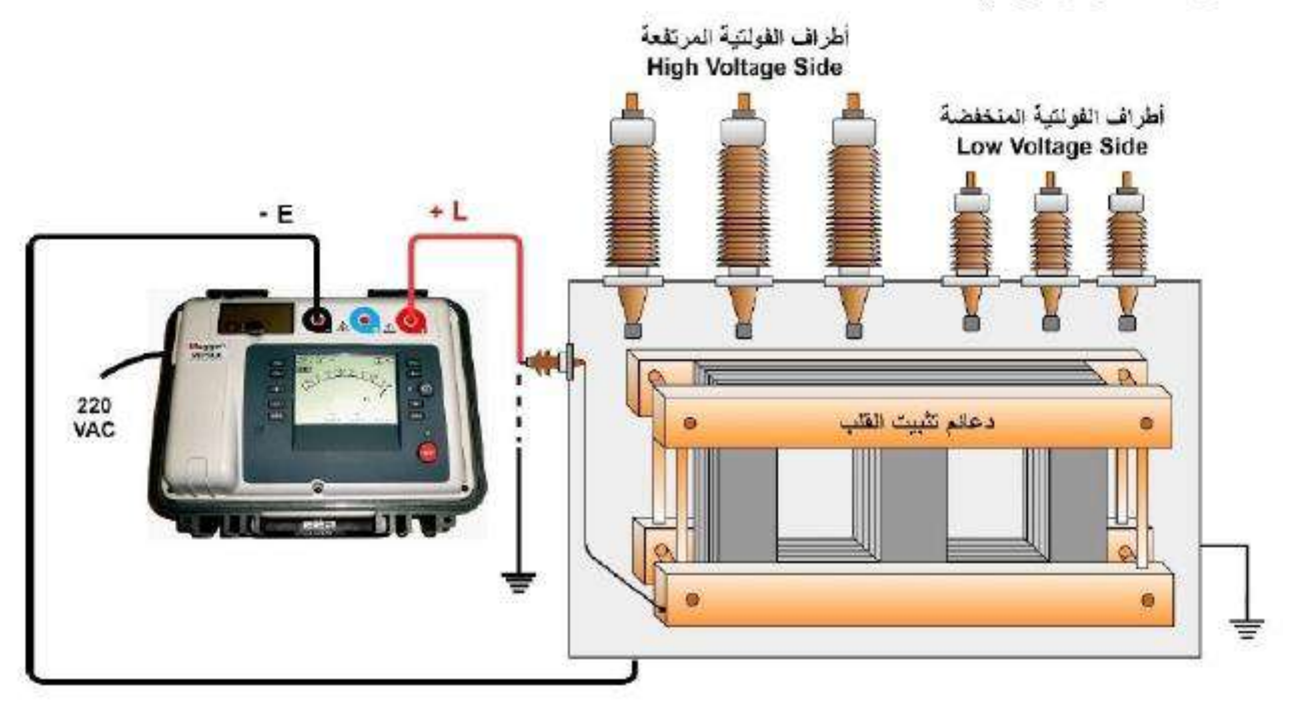
ملحوظة (9-2): من الأعطال الأكثر إنتشاراً هي وجود عطل أرضي على الخط والواصل بين القلب الحديدي و الأرض، بحيث يكون مكان التأريض (العطل) قريب من عازل الإختراق أو ما يُسمى جُلبة تأريض القلب (**Core Grounding Bushing**)، وفي هذه الحالة يُمكن للمحول الإستمرار بالعمل دون مخاوف من تَكوّن تيارات دَوّارة ذات تأثير كبير.

6.4 دعائم تثبيت القلب – Core Clamp

بما أن دعائم التثبيت الخاصة بالقلب الحديدي (**Core Clamp**) تتكون من أجزاء معدنية و كما هو معلوم أنها تقع في مرمى الفيض المُتسرب من القلب الحديدي على غرار القلب الحديدي نفسه، كان لزاماً عزل هذه الدعائم عن الأرض وتأريضها من نقطة واحدة فقط كما هو الحال في القلب الحديدي وللأسباب ذاتها. لذلك يُمكن أيضاً تطبيق فحص مقاومة العزل (**Insulation Resistance – IR**) على

هذه الدعائم، وذلك بقياس مقاومة العزل بين دعائم التثبيت والأرض (**Core Clamp to Ground**) أو بين دعائم التثبيت والقلب الحديدي (**Core Clamp to Core + Ground**).

الشكل (**2-16**) يوضح توصيلة الفحص الخاصة بدعائم التثبيت (**Core Clamp to Ground**)، بحيث يتم فصل كيبل التأريض عن عازل الإختراق أو كما يُسمى جُلبة التأريض (**Grounding Bushing**) ومن ثم وصل طرف جهاز الفحص الموجب (**L**) (**+**) مع طرف جلبة التأريض الخاصة بدعائم التثبيت (**Core Clamp Grounding Bushing**) ثم يتم وصل طرف جهاز الفحص السالب (**E**) (-) بالأرضي أو جسم المحول كما هو موضح في الشكل (**2-16**).



الشكل رقم (2-16)

7. خطوات الفحص

الخطوات التالية تم وضعها بالإعتماد على المعايير الخاصة بمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE C57.152-2013]** بالإضافة إلى الخبرة العملية في عمل هذا الفحص في الموقع:

7.1 عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (**Lock-out Tag-out LOTO**).

7.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خِشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

7.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Recommended Practices for Safety in High-**

[ANSI National و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير Voltage and High-Power Testing] [OSHA Specifications و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية Electrical Safety Code] .for Accident Prevention Signs and Tags]

7.4 التأكد من توصيل خزان المحول (**Transformer Tank**) والقلب الحديدي (**Iron Core**) بالأرض طيلة مدة الفحص.

7.5 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**) وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) وكذلك الحال بنقطة التعادل (**Neutral point**) للمحول إن وجدت.



تحذير: يجب تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (**Earthing Dis-connector**) أو المتحركة (**Portable**) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines - OHL**) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.

7.6 فصل أية أجزاء ثانوية مُرتبطة بملفات المحول من محولات فولتية (**Voltage transformers**) و حارفة (مانعة) الصواعق (**Surge arresters**) و المُكثفات (**Capacitors**) أو أية عدادات (**Meters**) وغيرها من الأنظمة الثانوية كوجود المُتحسسات الخاصة بقياس التفريغ الجزئي (**PD Couplers**).

7.7 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول قبل الفحص (**Trapped Charges**) وذلك بعمل قِصَر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن كما سيتم شرحه في أخر الفصل.

7.8 توصيل أطراف أطوار الفولتية المرتفعة (**HV terminals**) مع بعضها، وكذلك أطراف أطوار الفولتية المنخفضة (**LV terminals**)، و التأكد من أن أسلاك التوصيل غير ملامسة لجسم المحول أو الأرض.



ملحوظة (2-10): في حال كانت ملفات المحول موصولة على شكل نجمة (**Star - Y**) يجب توصيل نقطة التعادل (**Neutral point H0 or X0**) مع الأطراف الخاصة بها كما هو مبين في النقطة السابقة.



تحذير: يجب تجنب ترك أطراف المحول مفتوحة (**Open Circuit**) على أي حال دون عمل وصلة قِصَر (**Short circuit**) بين هذه الأطراف طيلة مدة الفحص.

7.9 إختيار جهاز فحص ميجا أوميتر (**Megohmmeter**) مناسب كالآتي:

- ✓ ذو مستوى فولتية فحص ثابتة (**DC Voltage**) مُناسب، عادة أجهزة الفحص ذات مستوى الفولتية (**5kV**) كيلو فولت تُعتبر كافية.
- ✓ ذو تدريج مقاومة مُناسب، عادة أجهزة الفحص ذات تدريج المقاومة بالميجا أوم تُعتبر كافية.
- ✓ إحتواء جهاز الفحص على الأسلوب المُراد إستخدامه في الفحص (**IR, DAR/AI, PI, SV or DD**).

7.10 عمل توصيلة الفحص المناسبة كما تم شرحه مسبقاً في فقرة توصيلة الفحص.

7.11 تشغيل جهاز الفحص وتحديد مستوى فولتية الإختبار الثابتة (**DC Test Voltage**) للمحول، حيث عادة ما تكون فولتية الفحص للملفات (**1000V – 5000V**) فولت حسب معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE C57.152-2013**]، وكذلك أوردت المعايير الخاصة بالمعهد الوطني الأمريكي للمعايير [**ANSI/NETA ATS-2009 Table100.5**] الجدول (**2-4**) والذي يوضح فولتيات الفحص المناسبة للملفات تبعاً للفولتية التشغيلية لهذه الملفات.

الجدول رقم (**2-4**)

مقدار الفولتية المترددة التشغيلية لملف المحول (AC Voltage)	أقل قيمة فولتية فحص (DC Voltage)
0 – 600 فولت	**1000** فولت
601 – 5000 فولت	**2500** فولت
أكثر من **5000** فولت	**5000**فولت

وعند تطبيق هذا الفحص على القلب الحديدي يكون مستوى الفولتية المُطبقة (**500V**) فولت فقط حسب المعايير الصادرة عن المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [**ANSI/NETA ATS-2009**]، وأن لا تزيد الفولتية المُطبقة عن (**1000V**) فولت حسب المعايير الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.152-2013**].

7.12 نقوم بالفحص بين مجموعة الملفات والأرض أو بين مجموعتي الملفات أو بين القلب الحديدي والأرض أو دعائم تثبيت القلب والأرض وفقاً للخطوات الموضحة في الملحق رقم (**1-2**) في حال إستخدام جهاز الفحص (**Insulation Tester MIT 1025 10kV**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**)، و الملحق (**2-2**) في حال إستخدام جهاز الفحص (**TeraOhmXA MI 3210 10kV**) المُصنّع بواسطة شركة (**METREL**)، و الملحق (**3-2**) في حال إستخدام جهاز الفحص (**1555 10kV insulation tester**) المُصنّع بواسطة شركة (**FLUKE**).

7.13 بعد الإنتهاء من الفحص يتم وصل الملفات بالأرضي لفترة من الزمن لحين التخلص من شحنة الملفات أو ما يُسمى بالـ(**Trapped Charges**).



تحذير: لا تَقُم بعمل هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت (**Oil Immersed Transformers**) في حال كانت مُفرغة من الزيت، لأن قيمة مقاومة العزل بوجود الهواء أقل بكثير من قيمة المقاومة بوجود زيت المحول مما يؤدي الى قيمة غير دقيقة للفحص وخوفاً من حدوث وميض قوس كهربائي (**Flashover**) مع الأرض.



تحذير: لا تقُم بعمل هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت (**Oil Immersed Transformer**) في حال كان فارغ من الزيت ومُفرغ من الهواء أيضاً (**Under Vacuum**)، وذلك خوفاً من حدوث وميض قوس كهربائي (**Flashover**) مع الأرض.



تحذير: لا تستخدم جهاز الميجا أوميتير (**Megohmmeter**) في الأجواء القابلة للإنفجار (**Explosive atmosphere**) أو في الاجواء الرطبة.



تحذير: يجب إيقاف الفحص بسرعة في حال ملاحظة إزدياد كبير في قيمة التيار التسرُبي دون إستقرار.



تحذير: لا تقُم بإزالة أسلاك الفحص (**Test Leads**) عن المحول بعد إنتهاء الفحص مباشرة لتجنب حدوث شرارة قوس كهربائي (**Arc flash**)، بل يجب إنتظار جهاز الفحص لحين إنتهاؤه من تفريغ شحنة الملفات حيث يُقدر زمن التفريغ من (**30s – 60s**) ثانية.



ملحوظة (11-2): لغايات التأكد من سلامة أسلاك الفحص (**Test leads**) وعدم وجود قطع في هذه الأسلاك والذي من شأنه إعطاء نتيجة فحص مقبولة غير واقعيّة، يُمكن إجراء فحص أولي عن طريق وصل أسلاك الفحص مع بعضها (وصل الطرف الموجب بالسالب) وتشغيل الجهاز للتأكد من أن الجهاز لن يقوم ببناء فولتية من الأساس وأن مقاومة العزل قرابة الصفر.

8. تصحيح القيمة المُقاسة

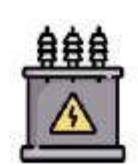
يُعد هذا الفحص من الفحوصات التي تتأثر قيمتها بتغيُّر درجة حرارة المادة العازلة تحت الفحص والتي تتمثل بحرارة الزيت للمحولات المغمورة بالزيت بعد إستقرار درجة حرارة المحول كما تم ذِكره مُسبقاً، لذلك ولغايات مُقارنة قِيَم المقاومات الناتجة عن هذا الفحص بقِيَم فحوصات القُبول المصنعيّة

(Factory Acceptance Test – FAT) أو المَوقعيّة (Site Acceptance Test – SAT) أو غيرها من القِيَم المرجعيّة كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (Routine Test) لهذا الفحص، يجب تصحيح قِيَم هذه المقاومات لدرجة الحرارة المَرجعية القياسية وهي عادةً (**20°**) درجة مئوية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير (**ANSI**) وغيرها من المعايير العالمية، وذلك بإستخدام الطرق التالية:

8.1 حسب الخبرة – Role of thumb

حسب التجربة والخِبرة المُسبقة يُمكن القول أن إرتفاع درجة حرارة المادة العازلة بمقدار عشر درجات مئوية من شأنه تقليل قيمة مقاومة العزل إلى النصف و العكس صحيح.

مثال: اذا كانت قيمة مقاومة العزل (**100 MΩ**) ميجا أوم عند درجة الحرارة المئوية (**30°**) فإن قيمة مقاومة العزل عند درجة الحرارة المئوية (**20°**) تساوي (**200 MΩ**) ميجا أوم.



ملحوظة (2-12): هذه الطريقة غير دقيقة كفاية خاصة إذا لم تكن الحرارة التي أُجريَ عندها الفحص من مضاعفات العدد عشرة.

8.2 حسابياً – Mathematically

وذلك بتطبيق المعادلة التالية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [**ANSI/NETA ATS-2009**]:

$$R_{20} = R_T \,.\, k_T \qquad (2.6)$$

حيث:

- R_{20} : قيمة المقاومة عند درجة حرارة (**20°**) درجة مئوية.
- R_T : قيمة المقاومة المقاسة عند درجة حرارة T.
- k_T : معامل تصحيح المقاومة و الذي يمكن إستخراج قيمته **بطريقتين**:

- **الطريقة الأولى :** حسابياً وذلك بتطبيق المعادلة التالية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009]:

$$k_T = 0.2525 \,.\, e^{0.0689T} \qquad (2.7)$$

حيث:

T : درجة الحرارة المئوية (**C°**) أثناء إجراء الفحص.

- **الطريقة الثانية :** يُمكن إيجاد قيمة معامل التصحيح (k_T) بالرجوع الى الجدول (**5-2**) والصادر عن المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [**ANSI/NETA ATS-2009 Table 100.14**] في حال كانت

درجة الحرارة التي أُجري عندها الفحص من مضاعفات العدد خمسة وذلك للمُعدات التي تحتوي على عازل مغمور بالزيت كما هو الحال في المحولات.

الجدول رقم (5-2)

درجة الحرارة (C°)	معامل التصحيح (k_T)	درجة الحرارة (C°)	معامل التصحيح (k_T)
-10°	0.125	55°	11.20
-5°	0.180	60°	15.85
0°	0.25	65°	22.40
5°	0.36	70°	31.75
10°	0.50	75°	44.70
15°	0.75	80°	63.50
20°	1.00	85°	89.789
25°	1.40	90°	127.00
30°	1.98	95°	180.00
35°	2.80	100°	254
40°	3.95	105°	259.15
45°	5.60	110°	509
50°	7.85		

9. تحليل نتائج الفحص

قبل الخوض في حيثيات تحليل نتائج فحص مقاومة العزل للمحولات المغمورة بالزيت (**Oil Immersed Transformers**) وجب التنويه إلى أن الزيت المتواجد داخل المحول يؤثر بقدر كبير على قيمة مقاومة العزل فمثلاً المحولات ذات زيت العزل من الإسترات الطبيعية (**Natural Esters**) تكون ذو قيمة مقاومة عزل أقل منها للمحولات المغمورة بالزيت المعدني (**Mineral Oil**)، ومن جهة أُخرى قيمة مؤشر الإستقطاب (**PI**) عادة ما تكون قريبة من العدد (1) لزيوت العزل الخاصة بالمحولات مما يعني أن مؤشر الإستقطاب الخاص بملفات المحول قد يتأثر بمؤشر الإستقطاب الخاص بزيت المحول مما يَحول دون الحصول على قيمة مؤشر إستقطاب تعكس الحالة الحقيقية لعزل ملفات المحول. لذلك من الصعب وضع قِيَم مرجعية أو دُنيا لهذا الفحص.

كما وتجدُر الإشارة إلى بعض القِيَم التقريبية لتحليل هذا الفحص لملفات المحول والقلب الحديدي و عوازل الإختراق و دعائم التثبيت التي تم التوصل إليها عملياً وحسابياً وفقاً لبعض المعايير والمراجع العالمية حسب الأسلوب المُتبّع في الفحص:

9.1 ملفات المحول – Transformer Winding

لتحليل نتائج هذا الفحص لملفات المحول وفقاً لأسلوب الفحص المُتّبع يُمكن إيجاد الآتي:

- **قراءات الزمن القصير – Short Time Readings or Spot Test**

من المُمكن تحليل نتائج الفحص الخاصة بهذا الأسلوب بعمل (**Trend**) ومقارنته بقراءات سابقة لنفس المحول كنتائج فحوصات القُبول المَصنعية (**Factory Acceptance Test – FAT**) أو المَوقعية (**Site Acceptance Test – SAT**) أو نتائج الفحوصات الروتينية السابقة (**Routine Test**) مع مراعاة أن تكون قيمة فولتية الفحص نفسها للفحوصات السابقة والحالية لغايات المقارنة. كما ويُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب بإتباع إحدى الطرق التالية:

  - **حسب الخبرة – Rule of Thumb**

أوردت بعض المراجع مثل **[Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing]** أنه في حال الحصول على قيمة مقاومة عزل مقدارها (**1MΩ**) ميجا أوم لكل (**1kV**) كيلوفولت من فولتية الفحص مضافاً إليها (**1MΩ**) يُمكن كهربة المحول (**Transformer Energization**) وإعادته للعمل بشكل آمن، أي أنه إذا تم فحص محول بتطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) مِقدارها (**5kV**) كيلوفولت و كانت نتيجة الفحص (**6MΩ**) ميجا أوم، تُعتبر هذه أقل نتيجة مُرضية وآمنه لإعادة المحول في الخدمة.

  - **حسابياً – Mathematically**

يُمكن حساب القِيَم الدُنيا لهذا الفحص بتطبيق المعادلة التالية - في حال تم تطبيق الفحص على الثلاثة أطوار معاً - الواردة في المرجع **[M. Horning, Transformer Maintenance Guide]**:

$$R_{20} = \frac{C\,.\,E}{\sqrt{kVA}} \tag{2.8}$$

حيث:

R_{20} : أقل قيمة مقاومة لهذا العازل بالأوم عند درجة حرارة (**20°**) مئوية.

E : الفولتية الإسمية للملفات (فولتية الطور V_{Ph}) بالفولت (**V**).

kVA : قدرة الملفات المفحوصة بالكيلو فولت أمبير (**kVA**).

C : ثابت يساوي **0.8** للمحولات الزيتية عند درجة حرارة (**20°**) مئوية، (**1.5**) مع زيت و(**30**) بدون زيت حسب (**Low voltage impulse testing of power transformers, Richenbacher, Alan Gregg 1976**).

- الرجوع للمعايير العالمية – International Standards

لم ترِد في المعايير الخاصة بهذا الفحص والصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) و اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) أي قِيَم دُنيا يُمكن الإعتماد عليها فيما يَخُص الفحص بهذا الأسلوب.

وللحصول على القِيَم الدُنيا لمقاومة العازل لمحولات المغمورة بالزيت يُمكن الإعتماد على مراجع أخرى كالدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445] حيث نجد القِيَم المُدرَجة بالجدول (2-6) عند درجة الحرارة (20°) درجة مئوية:

الجدول رقم (2-6)

مستوى فولتية ملف المحول	مقاومة العزل
أقل من أو تساوي **69** كيلوفولت	أكثر من **1000** ميجا أوم
أكثر من **69** كيلوفولت	أكثر من **500** ميجا أوم

أما فيما يَخُص المعايير الصادرة عن المعهد الوطني الأمريكي للمعايير [ANSI/NETA ATS-2009 Table100.5] يُمكن إيجاد الجدول (2-7) والذي يَضُم القِيَم الدُنيا لمقاومة العزل للمحولات المغمورة بالزيت:

الجدول رقم (2-7)

مستوى فولتية ملف المحول	أقل قيمة مقاومة عزل
0 – 600 فولت	**100** ميجا أوم
601 – 5000 فولت	**1000** ميجا أوم
أكثر من **5000** فولت	**5000** ميجا أوم

كما ويُمكن إيجاد الجدول (2-8) والذي يَضُم القِيَم الدُنيا لمقاومة العزل للمحولات المغمورة بالزيت عند درجة حرارة (20°) مئوية والمُضمَّن في المرجع [Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing].

الجدول رقم (2-8)

مستوى فولتية ملف المحول	أقل قيمة مقاومة عزل
6.6 كيلو فولت	**400** ميجا أوم
6.6 – 19 كيلو فولت	**800** ميجا أوم
22 - 45 كيلو فولت	**1000** ميجا أوم
أكثر من **66** كيلو فولت	**1200** ميجا أوم

• القراءات المرتبطة بالزمن (مؤشر الإمتصاص والإستقطاب) – Time-Resistance Readings (AI & PI)

يُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب بعمل (**Trend**) ومقارنته بقراءات سابقة لنفس المحول كنتائج فحوصات القُبول المصنعية (**Factory Acceptance Test – FAT**) أو الموقعية (**Site Acceptance Test – SAT**) أو نتائج الفحوصات الروتينية السابقة (**Routine Test**) إن وُجدت، الجدول (**2-9**) يضم القِيَم النموذجية لمؤشر الإستقطاب (**PI**) للمحولات المغمورة بالزيت حسب المعايير الخاصة بمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.152-2013]**.

الجدول رقم (**2-9**)

مؤشر الإستقطاب Polarization Index - PI	حالة العزل
أقل من **1**	خطير
1 – 1.1	ضعيف
1.1 – 1.25	متوسط (يحتاج لبحث)
1.25 - 2	مقبول
أكثر من **2**	جيد

وكذلك أورد كُتيّب التعليمات (**Manual**) الخاص بجهاز فحص العازلية المُصنّع بواسطة (**MEGGER**) الجدول (**2-10**) للقِيَم النموذجية لقيمة مؤشري الإستقطاب و الإمتصاص (**AI & PI**) بشكل عام.

الجدول رقم (**2-10**)

مؤشر الإستقطاب Polarization Index - PI	مؤشر الإمتصاص Absorption Index - AI	حالة العزل
أقل من **1**	أقل من **1.25**	خطير
1 -2	**1.25 - 1.4**	متوسط (يحتاج لبحث)
2 - 4	**1.4 – 1.6**	جيد
أكثر من **4**	أكثر من **1.6**	ممتاز

• قراءات المقاومة المرتبطة بالفولتية - Step-voltage Readings SV

يُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب وذلك برسم العلاقة بين قيمة مقاومة العزل ومستوى الفولتية كما هو مبين بالشكل [**(2-6) (ب)**]، حيث أن إنخفاض قيمة مقاومة العزل عند الإرتفاع بالفولتية بقدار (**25%**) بالمئة من شأنه الدلالة على وجود عطل في هذا العازل كتقادم هذا العازل أو وجود شقوق أو فجوات بداخله **[M. Horning, Transformer Maintenance Guide]**.

- قراءات تيار تفريغ العازل - Re-absorption Current or Dielectric Discharge DD

يُمكن تحليل نتائج الفحص بهذا الأسلوب بالرجوع إلى الجدول **(2-11)** والمُضمَّن في كُتيّب التعليمات **(Manual)** الخاص بجهاز فحص العازلية المُصنع بواسطة شركة **(MEGGER)**.

الجدول رقم **(2-11)**

تفريغ العازل – Dielectric Discharge DD	حالة العزل
أكثر من **7**	خطير
7 - 4	ضعيف
4 – 2	متوسط (يحتاج لبحث)
أقل من **2**	جيد
0	مثالي

9.2 عوازل الإختراق / الجُلَب – Bushings

نظراً لإختلاف التصاميم الخاصة بعوازل إختراق المحولات **(Transformer Bushing)** فمنها ما يكون مملوء بالزيت ومنها ما هو هوائي ومنها ما هو جاف وغيرها من التصاميم، لذلك لا توجد قِيَم دُنيا مُتفق عليها لفحص مقاومة العزل الخاصة بهذا النوع من العوازل، إلا أنه بالرجوع إلى بعض الدراسات والمعايير الصادرة عن **[Bureau of Reclamation, Testing and Maintenance of HV Bushings Volume 3-2]** سنجد الآتي "إذا تم فحص عازل إختراق **(Bushing)** بتطبيق فولتية ثابتة مقدارها **(2500V)** وكانت قيمة مقاومة العزل مرتفعة فإن ذلك لا يعني قطعاً أن العازل بحالة ممتازة، و في حال الحصول على قيمة مقاومة عزل أقل من **(20GΩ)** جيجا أوم فإن هذا العازل بحاجة لبحث لتأكد من سلامته".

9.3 القلب الحديدي – Iron Core

لتحليل نتائج هذا الفحص الخاصة بالقلب الحديدي و بالرجوع إلى المعايير والمراجع العالمية يُمكن إيجاد الآتي:

حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, Std C57.152-2013]** يُمكِن إيجاد الجدول **(2-12)** فيما يَخُص القِيَم الدُنيا لهذا الفحص و الخاصة بالقلب الحديدي.

أما فيما يَخُص المعايير الصادرة عن المعهد الوطني الأمريكي للمقاييس **[ANSI/NETA ATS-2009]** فقد إقترحت مقارنة نتيجة فحص مقاومة العزل الخاصة بالقلب الحديدي مع القيمة المَصنعيّة **(FAT)** بالإضافة إلى التأكد من عدم الحصول على قيمة أقل من **(1MΩ)** ميجا أوم كنتيجة لهذا الفحص عند تطبيق **(500VDC)** فولت.

الجدول رقم (2-12)

نوع المحول	قيمة مقاومة العزل للقلب	حالة العزل
محول جديد	أكبر من **500** ميجا أوم	طبيعي (وفي حال كانت القيمة أقل من **500** ميجا أوم يجب التواصل مع مُصنّع المحول)
محول قديم	أكبر من **100** ميجا أوم	طبيعي
	من **10** إلى **100** ميجا أوم	دلالة على تدهور المادة العازلة
	أقل من **10** ميجا أوم	بحاجة لبحث و تواصل مع المُصنّع

وحسب الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **[CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445]**، فإنه في حال الحصول على مقاومة عزل أكبر من أو تساوي **(10MΩ)** ميجا أوم فإنها تعتبر مقبولة، أما إذا كانت مقاومة العزل أقل من **(100kΩ)** كيلو أوم فإنه يُعتبر مؤشر على فشل نظام العزل الخاص بالقلب الحديدي.

وقد أورَدت بعض المراجع مثل كتاب **[M. Horning, Transformer Maintenance Guide]** طريقة التحليل التالية لفحص مقاومة العزل الخاص بالقلب الحديدي "في حال الحصول على قيمة مقاومة عزل للقلب الحديدي من **(1Ω - 2Ω)** أوم فإن ذلك مؤشر على وجود تأريض مباشر أو ما يُسمى بالتأريض الصلب (**Solid Ground**) ويجب إصلاح هذا العطل، أما في حال الحصول على مقاومة عزل للقلب الحديدي قرابة الـ**(200Ω - 400Ω)** أوم فإن ذلك مؤشر على تأريض للقلب ذو مقاومة مرتفعة غير مرغوب به (**High resistance ground**) أو ما يُسمى بالـ(**Inadvertent ground**) ويمكن إجراء بعض الحلول الموقعية للحد من هذه المشكلة والمذكورة سابقاً في هذا الفصل".

10. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

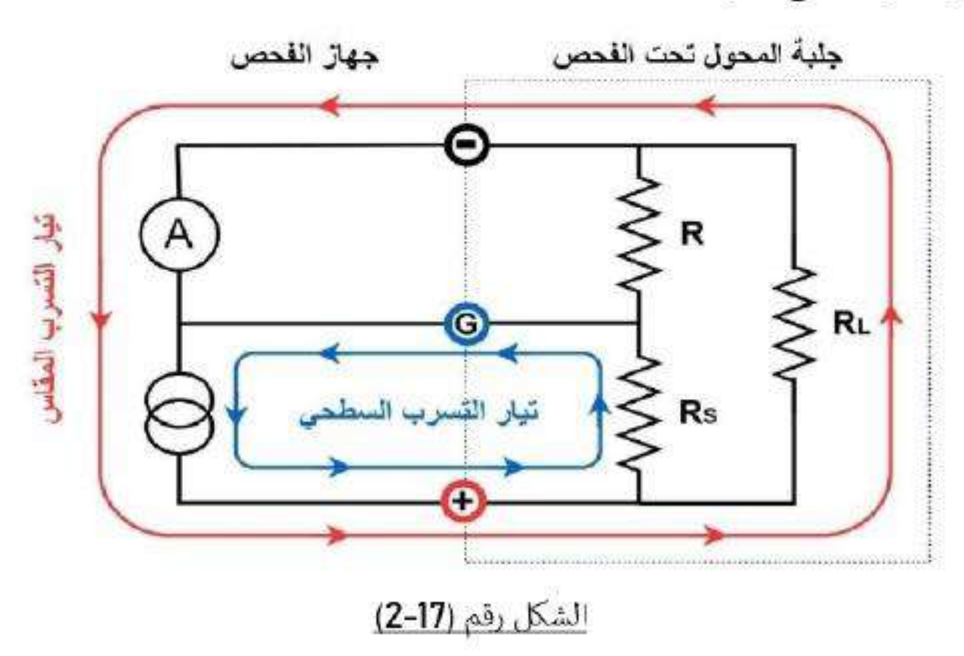
هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل عند إجراء هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

10.1 نظافة سطح العازل – Insulation Material Surface Condition

تُعتبر الحالة الخارجية للمادة العازلة أو كما يُمكن تسميتها بالنظافة الخارجية لسطح العازل من أهم العوامل التي تؤثر على قيمة هذا الفحص، حيث أنه بإزدياد نسبة تلوث سطح المادة العازلة تزداد قيمة التيار التسرُبي عبر هذا السطح مما يؤثر بشكل مباشر على قيمة مقاومة العازل المُقاسة كما تم شرحه سابقاً. وكما هو معلوم أن هنالك نوعان من المُلوثات أحدهما موصل للتيار الكهربائي بطبيعته كالكربون أو الرماد والآخر غير موصل للتيار الكهربائي بطبيعته كالغبار والملح مثلاً ولكن مع إمتزاجها بالزيت أو الماء فإنها تُصبح موصلة للتيار الكهربائي إلى حدٍ ما مما يُسهل تكون تيار التسرُب السطحي سابق الذكر.

وللتخلّص من تأثير هذا العامل يجب تنظيف سطح المادة العازلة قبل الفحص وكذلك إستخدام مَنفذ الـ(**Guard**) الموجود بجهاز الفحص كما هو مبين في الشكل (**2-14**) والذي يوضح كيفية قياس مقاومة العزل لعازل إختراق محول (**Transformer bushing**) مع مراعاة إستخدام مَنفذ الـ(**Guard**).

ويوضح الشكل (**2-17**) الدائرة المُكافئة لتوصيلة فحص مقاومة العزل لعازل إختراق محول (**Transformer Bushing**) الظاهرة في الشكل (**2-14**) مع مراعاة إستخدام مَنفذ الـ(**Guard**) حيث (R_S) تُمثل مقاومة سطح العازل.



الشكل رقم (**2-17**)

10.2 الرطوبة – Moisture

إن الرطوبة (قطرات الندى) المُتشكلة على سطح المادة العازلة من شأنها زيادة تيار التسرُب السطحي مما يؤدي إلى إنخفاض قيمة مقاومة العزل. لذلك يُفضّل عدم إجراء هذا الفحص عند درجات حرارة جوية مُحيطة دون درجة حرارة تكون قطرات الندى (**Dew point temperature**).

10.3 درجة حرارة العازل – Insulation Material Temperature

تأثير درجة الحرارة على قيمة المقاومة يختلف للمعادن عنه للمواد غير المعدنية، حيث أن إرتفاع درجة حرارة المواد المعدنية يؤدي إلى ما يُسمى بالتهييج الحراري (**Thermal agitation**) والذي بدوره يؤدي إلى إنخفاض متوسط المسار الحر لحركة الإلكترونات ونتيجة لذلك تنخفض حركة الإلكترونات الحرة مما يزيد من مقاومة المادة المعدنية، أما فيما يَخُص المواد العازلة الجيدة فإن الإرتفاع في درجة الحرارة يقوم بتزويد المادة بطاقة حرارية (**Thermal energy**) من شأنها زيادة حَملة الشحنة (**Charge carriers**) مما يُقلل من مقاومة المادة العازلة على العكس المادة المعدنية.

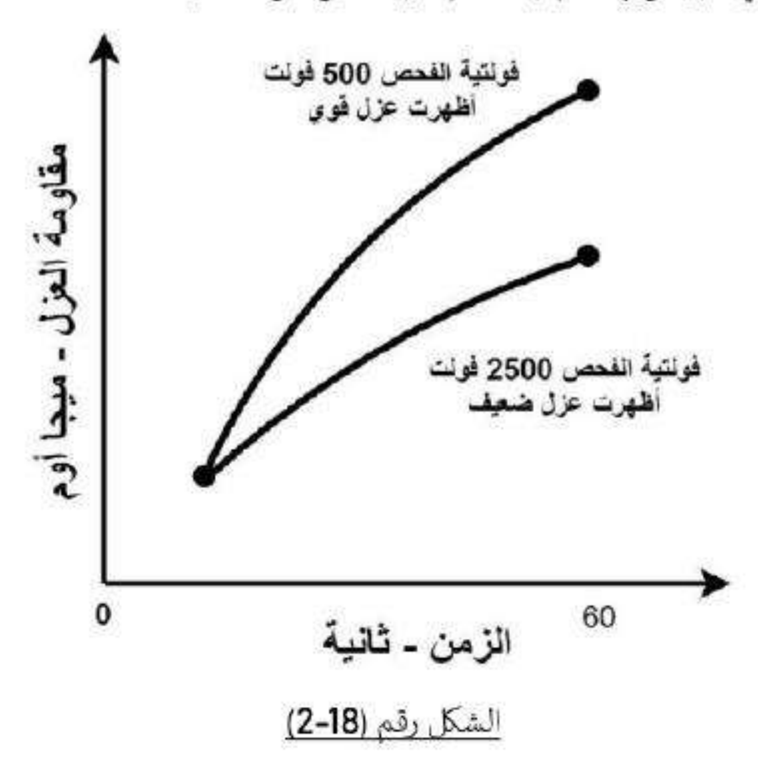
ومن الجدير بالذكر أن درجة حرارة المادة العازلة تؤثر على قيمة مقاومة العزل (**IR**) أو كما تُسمى بالـ(**Spot Test**) ولا تؤثر على قيمة مؤشر الإمتصاص و الإستقطاب (**PI** و **AI**) للسبب المذكور سابقاً.

لذلك لا يُنصح بعمل هذا الفحص في درجة حرارة جو محيط (**Ambient temperature**) دون درجة حرارة تكون قطرات الندى (**Dewpoint temperature**)، حيث أنه في حالة وجود شِق (**Crack**) في سطح المادة العازلة وكان هنالك ماء في هذا الشِق فإن الماء تحت درجات تكون قطرات الندى يكون قد تحول لجليد، وهذا الجليد تختلف خصائصة تماماً عن الماء وأهمها فقدانه للموصلية الكهربائية إلى حدٍ ما، مما يَعني ظُهور نتيجة فحص مقاومة عزل جيدة ولا تعكس الحالة الحقيقية للمادة العازلة.

10.4 مقدار فولتية الفحص – Test Voltage Level

يُمكن ملاحظة إختلاف في قيمة مقاومة المادة العازلة نتيجة لإختلاف فولتية الفحص كما هو الحال في أسلوب الفحص (**SV**)، حيث من المُمكن أن تنخفض قيمة مقاومة العازل نتيجة لزيادة فولتية الفحص كما هو مبين في الشكل (**2-18**).

في هذه الحالة ومع ارتفاع فولتية الفحص يُمكن قُبول الإختلاف البسيط في قيمة هبوط المقاومة، أما إذا كان الإختلاف كبير أي أكبر من (**25%**) بالمئة فإنه يَدل على عزل ضعيف.



الشكل رقم (2-18)

10.5 الشحنات المُخزّنة في الملفات – Stored Charge on Windings

تتأثر قيمة مقاومة العازل نتيجة للشحنات المخزنة في ملفات المحول خاصة بعد فحص مقاومة الملفات (**Winding Resistance Measurement - WRM**) وهو ما يُسمى بتأثير الذاكرة للعزل (**Memory Effect**)، لذلك يجب تفريغ الملفات من الشحنات المُتبقية قبل البدء بالفحص وذلك عن طريق تأريض الملفات لمدة زمنية لا تقل عن أربعة أضعاف المدة الزمنية لشحنها (مدة فحص مقاومة الملفات - **WRM**) مثلاً ولمعلومات أكثر حول هذا الموضوع يُمكن قراءة الفقرة الخاصة بتفريغ هذه الشحنات في آخر الفصل.

11. فحوصات إضافية داعِمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أُخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في الفحص الأول وتحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

11.1 الملفات

عند إجراء هذا الفحص على ملفات المحول وفي حال الحصول على قيمة (**Insulation Resistance – IR**) أو (**Polarization Index – PI**) منخفضة جداً مما يَعني وجود عطل أرضي للملفات أو وجود قِصر (**short circuit**) بين الملفات أو وجود ما يُسمى بالـ(**Carbon Tracking**)، لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها فحص الـ(**Polarization and Depolarization Current - PDC**) و فحص الـ(**Frequency Domain Spectroscopy - FDS**) بالإضافة إلى فحص معامل التبدد أو القدرة (**Dissipation/Power Factor – Df/PF**) و فحص الفولتية المُستحثة (**Induced Voltage Test**)، كما ويُنصح أيضاً قياس مستوى الرطوبة في زيت العزل للمحول (**Water content or Moisture**).

11.2 عوازل الإختراق

بالنسبة لعوازل الإختراق (**Transformer Bushings**) لا يُعد فحص مقاومة العازل من الفحوصات التي من شأنها الكشف عن الأعطال بشكل مُبكر، مما يعني أن فشل هذا الفحص مؤشر على وجود عطل في مراحله المتقدمة ويحتاج لبحث وإجراءات تصحيحية فورية، لذلك فيما يخُص عوازل الإختراق (**Bushings**) هنالك الكثير من الفحوصات التي من شأنها الكشف عن حالتها بشكل أكثر دِقة كفحص معامل التبدد أو القدرة عند التردد الإسمي (**Dissipation/Power Factor @ line Frequency – DF/PF**) وفحص المُواسعة (**Capacitance - C**) وفحص (**Dissipation/Power Factor tip-up**) وفحص (**Variable Frequency Dissipation/Power Factor**) و فحص (**Dielectric Frequency Response – DFR**) وفحص التفريغ الجُزئي (**Partial Discharge – PD**)، كما ويُنصح أيضاً بإجراء فحص الغازات الذائبة في زيت عازل الإختراق (**Dissolved Gases Analysis - DGA**).

11.3 القلب الحديدي

عند إجراء هذا الفحص على القلب الحديدي وفي حال الحصول على قيمة (**Insulation Resistance – IR**) مُنخفضة جداً مما يَعني وجود عطل أرضي لهذا القلب الحديدي أو كما ذُكر سابقاً هنالك نقطة تأريض أخرى، لذلك لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها فحص معامل التبدد أو القدرة (**Dissipation/Power Factor –**

DF/PF) وفحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (Sweep Frequency Response Analysis - SFRA).

12. تفريغ الملفات و إزالة تَمَغنُط القلب الحديدي

عادةً بعد فحص مقاومة العزل (Insulation Resistance - IR) و فحص مقاومة ملفات (Winding Resistance Measurement - WRM) أي عموماً بعد الفحوصات التي يتم من خلالها تطبيق فولتية ثابتة (DC Voltage) والتي بدورها تقوم بشحن ملفات المحول (Winding Trapped Charge) وكذلك تؤدي إلى تَمَغنُط القلب الحديدي للمحول أو ما يُسمى بال(Core Magnetization)، فإنه من الضروري تفريغ شحنة الملفات (Winding Discharge) و كذلك إزالة تَمَغنُط القلب الحديدي (Core De-magnetization) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل كهربة المحول (Transformer energization) أو إجراء فحوصات أُخرى وذلك تجنباً لحدوث الظواهر التالية:

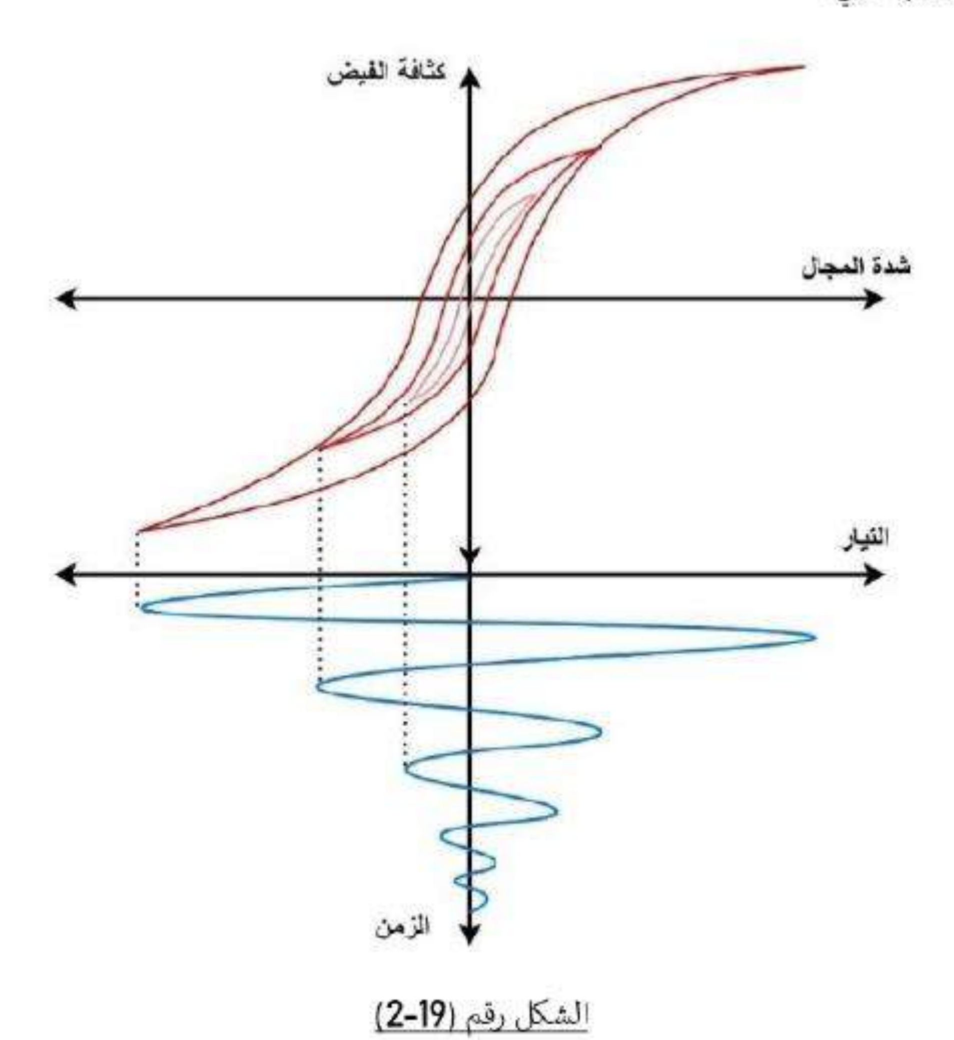
- حدوث صدمة حثية (Induction Kickback) ناتجة عن الطاقة المخزنة في محاثة ملفات المحول ($E = \frac{1}{2}\ I^2 L$) والتي قد تنطوي على مخاطر من شأنها التأثير على الأشخاص و المُعدات.
- ظهور تيارات عالية غير إعتيادية (High Inrush Current) عند كهربة المحول (Transformer Energization).
- ظهور نتائج غير دقيقة عند تطبيق الفحوصات التالية:
  - الإستجابة الترددية للخسائر الشاردة - Frequency Response of stray losses FRSL
  - نسبة لفات المحول - Transformer Turns Ratio TTR
  - مُفاعلة التسرُب - Transformer Leakage Reactance
  - تيار التهييج - Transformer Excitation Current
  - تحليل الإستجابة الترددية المَسحي – Sweep Frequency Response Analysis

لذلك يجب تفريغ الطاقة المخزنة في الملفات (Winding Discharge) وذلك عن طريق قَصر (Short circuit) أطراف ملفات المحول ووصلها بالأرض لفترة زمنية مناسبة وتُقَدّر بأربعة أضعاف زمن تطبيق الفولتية الثابتة على الملفات أثناء الفحص أو قُرابة ال 30 ثانية كما هو مذكور في بعض المراجع والمعايير، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة والمُصنّعة بواسطة شركة (MEGGER, OMICRON & METREL) تقوم بالتفريغ تلقائياً بعد الإنتهاء من إجراء الفحص.

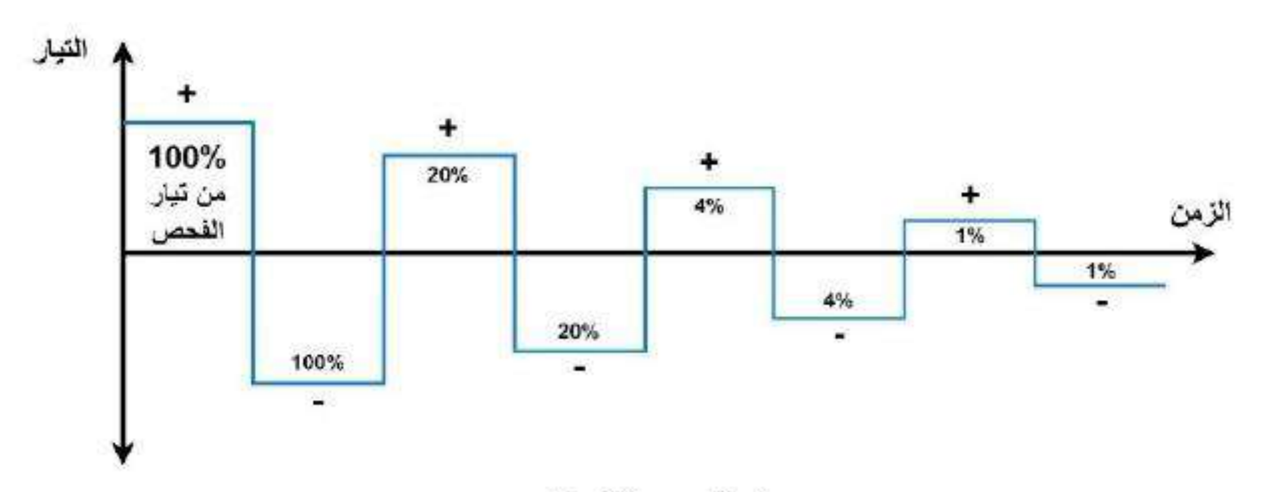
أما فيما يَخُص إزالة تَمَغنُط القلب الحديدي للمحول (Core De-magnetization) فإنه يتم بعدة طُرق وهي:

- **طريقة التسخين:** في هذه الطريقة يتم تسخين المادة المُراد إزالة تمغنطها لدرجة حرارة فوق درجة حرارة كيوري (Curie Temperature)، وهي درجة الحرارة التي تفقد عندها المادة خصائصها المغناطيسية فمثلاً للحديد المُكّون للقلب الحديدي تساوي (770°) درجة مئوية. ولكن هذه الطريقة لا يُمكن إستخدامها في المحولات نظراً لخطورتها على المادة العازلة.

- **طريقة حقن تيار متناقص:** في هذه الطريقة يتم حقن تيار متناقص في الملفات حتى الوصول إلى حالة عدم المغنطة ويتم ذلك بطريقتين وهما طريقة التيار المتردد **(AC)** كما هو موضح في الشكل **(2-19)** وهي طريقة قد تنطوي على بعض المخاطر فيما يَخُص السلامة العامة نظراً لإرتفاع قيمة الفولتية المتناقصة، وعادة ما يتم إجراء هذه الطريقة في المختبرات المُجهزة لذلك ونادراً ما يتم عمل هذه الطريقة في الموقع، لذلك يتم اللجوء لطريقة التيار الثابت **(DC)** متردد القطبية **(Alternating polarities)** والمتناقص مع الزمن إلى حين التخلّص من تَمَغنُط القلب الحديدي للمحول كما هو موضح بالشكل **(2-20)** وذلك حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.152-2013]** حيث أن هذه الطريقة لا تحتاج لفولتية مرتفعة كنظيرتها للتيار المُتردد سابق الذكر، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة مثل (**TESTRANO by OMICRON**) تقوم بإزالة تَمَغنُط القلب الحديدي **(De-magnetization)** تلقائياً أو يدوياً بعد الإنتهاء من إجراء الفحوصات التي تعتمد تطبيق فولتية ثابتة على ملفات المحول كفحص مقاومة الملفات **(WRM)** كما هو مُبين بالملحق **(3-5)** في نهاية فصل فحص مقاومة الملفات **(WRM)** التالي.



الشكل رقم **(2-19)**



الشكل رقم (20-2)

13. أمثلة على نتائج فحوصات مَصنعيّة

13.1 المثال الأول: الشكل (21-2) يُبين قِيَم فحص مقاومة عزل (**Insulation Resistance**) مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three Phase Two Winding**) موصول بطريقة (**YNd11**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**DETC** أو **OCTC**).

Acceptance
Test Certificates

Customer :	INSULATION RESISTANCE MEASUREMENT		Page No :
			Serial No.:
	Standard :	IEC 60076-1	Report No.:
Rated Power(MVA): 100/140	Rated Voltage(kV):	400/15	Vector Group:

Weather : Indoor - Closed Place

Ambient temperature : 22,0 °C

Relative humidity : 40,0 %

Object temperature : 29,1 °C

MEASUREMENTS	TEST VOLTAGE (kV)	at 15 th seconds (MΩ)	at 30 th seconds (MΩ)	at 45 th seconds (MΩ)	at 60 th seconds (MΩ)	at 600 th seconds (MΩ)	PI*=R600/R60
HV - TANK; ... LV(Guarded)	5	45100	51200	55300	56500	75100	1.33
HV - LV; ... TANK(Guarded)	5	70300	120000	140000	147000	294000	2.00
LV - TANK; ... HV(Guarded)	5	25000	30100	45200	49000	151900	3.10
CORE - TANK	1	7000	10000	12100	16200	-	NA

الشكل رقم (21-2)

13.2 المثال الثاني: الشكل (**2-22**) يُبين قِيَم فحص مقاومة عزل (**Insulation Resistance**) مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (**Three Phase Tertiary Winding**).

Measurement of d.c. insulation resistance between each winding to earth and between windings

Relative humidity :33% | Atmospheric pressure:0.095MPa | Oil temperature: 23.1C

Measured sequence and data

Tested winding	Earthing parts	Insulation resistance values (MΩ) R_{15s}	Insulation resistance values (MΩ) R_{1min}	Absorption ratio	Test voltage (V)
HV	Other winding、core、frame and tank enclosure	1500	2620	1.75	5000
LV1		1840	4050	2.20	5000
LV2		2100	3500	1.67	5000
HV + LV1+LV2		2050	3450	1.68	5000

Measured sequence and data between windings

Tested winding	Earthing parts	Insulation resistance values (MΩ) R_{15s}	Insulation resistance values (MΩ) R_{1min}	Absorption ratio	Test voltage (V)
HV to LV1	Core、frame and tank enclosure	1900	4180	2.20	5000
HV to LV2		2700	5670	2.10	5000
LV1 to LV2		4100	7380	1.80	5000
Test esults	Measured values meet the relevant requirements				

core and frame insulation for liquid immersed transformers

Tested winding	Earthing parts	Insulation resistance values of R_{1min} (MΩ)	Test voltage (V)
Core	Winding frame and tank enclosure	>1000	2500
Frame	Winding core and tank enclosure	>1000	2500
Test esults	Measured values meet the relevant requirements		

الشكل رقم (**2-22**)

الملحق (1-2)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط ، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة العزل بإستخدام جهاز
Insulation Tester MIT 1025 10kV by MEGGER



الشكل رقم (1-1-2)

- **مواصفات الجهاز:** حسب ال(MIT 1025 manual)
  - فولتية المدخل الإسمية : 90-264 V rms, 47-63 Hz, 100VA
  - نطاق فولتية المخرج : 500, 1000, 2500, 5000, 10000 VDC
  - دِقة فولتية الفحص : +4%, -0%, ±10% V nominal test voltage @ 1GΩ load
  - نطاق المقاومات المُقاسة : (10 kΩ – 15 TΩ @ 5kV), (10 kΩ – 20 TΩ @ 10kV)
  - أساليب الفحص : IR, IR(t), DAR, PI, SV, DD, Ramp test
  - دِقة القياسات من 1MΩ إلى : (±5% ≤ 2TΩ), (±20% to 20TΩ)

- درجة الحماية IP : IP65 (Lid closed), IP40 (Lid open)
- وزن الجهاز : 10 lb. (4.5 kg)
- البيئة التشغيلية المحيطة : -4° F to 122° F (-20° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -13° F to 149° F (-25° C to 65° C) RH to 95%, Non condensing

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**7.1** إلى **7.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة العزل (**IR**).
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة و عدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. لا تقُم بلمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك الـ(**Crocodile Clips**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور للعزل الخاص بها.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضل التعرف على أجزاء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم و لمبات إشارة كما هو مبين بالشكل (**2-1-2**).



الشكل رقم (2-1-2)

7. إحضار جهاز الفحص إلى الموقع و توصيل الأسلاك الخاصة به على النحو التالي:

7.1 التأكد من أن المفتاح المركزي لجهاز الفحص على وضعية (**OFF**).

7.2 توصيل جهاز الفحص بالمصدر الكهربائي (**Power cable**).

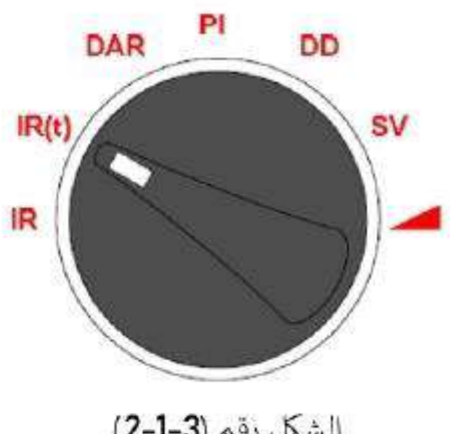
7.3 توصيل السلك الأحمر بالمكان المخصص له على الجهاز (**L+**) منفذ الفحص الموجب.

7.4 توصيل السلك الأزرق بالمكان المخصص له على الجهاز (**Guard - G**) منفذ الفحص الأزرق.

7.5 توصيل السلك الأسود بالمكان المخصص له على الجهاز (**E-**) منفذ الفحص السالب.

8. توصيل أسلاك جهاز الفحص (**Test Leads**) بأطراف المحول وذلك بالرجوع إلى الجداول (**2-2**) و (**2-3**) وكذلك الأشكال (**2-9**) إلى (**2-16**) من فصل فحص مقاومة العزل وذلك بعد إختيار التوصيلة المناسبة.

9. إختيار أسلوب الفحص المناسب وذلك من خلال تغير وضعية المفتاح الموضح في الشكل (**2-1-3**).



الشكل رقم (**2-1-3**)

حيث يُمكننا هذا الجهاز من القيام بالفحص وفقاً للأساليب التالية:

9.1 **الأسلوب الأول ((IR(t)) قراءات الزمن القصير (Spot Test)؛** بعد إختيار هذا الأسلوب تظهر على الشاشة مدة الفحص وعادة ما تكون دقيقة واحدة ويُمكن تغيرها عبر السهم العلوي والسفلي ثم الضغط على زر الموافقة (**OK**).

9.2 **الأسلوب الثاني (Dielectric Absorption Ratio DAR or AI)؛** بعد إختيار هذا الأسلوب وهو ناتج قسمة (**t2/t1**) يظهر على الشاشة الزمن (**t1**) ثم (**t2**) وعادة ما يجب ضبط قيمة (**t1**) لهذا الأسلوب (**30 sec**) ثانية و الزمن (**t2**) على (**1 min**) دقيقة و من ثم الضغط على زر موافقة (**OK**).

9.3 **الأسلوب الثالث (Polarization Index PI)**؛ بعد إختيار هذا الأسلوب وهو ناتج قسمة (**t2/t1**) يظهر على الشاشة الزمن (**t1**) ثم (**t2**) وعادة ما يجب ضبط قيمة (**t1**) لهذا الأسلوب (**1 min**) دقيقة و الزمن (**t2**) على (**10 min**) دقائق و من ثم الضغط على زر موافقة (**OK**).

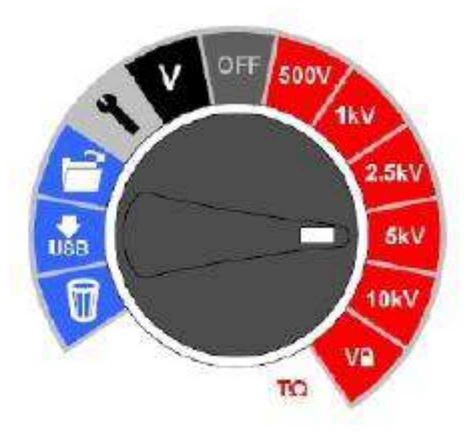
9.4 **الأسلوب الرابع (Dielectric Discharge DD)**؛ بعد إختيار هذا الأسلوب والذي يعتمد على قياس التيار في الدقيقة الأولى بعد تطبيق الفولتية الثابتة على المادة العازلة بزمن مقداره (**t1**) و الذي عادة ما يتم ضبطه ليكون (**30 min**) دقيقة ومن ثم الضغط على زر الموافقة (**OK**).

9.5 **الأسلوب الخامس (Step Voltage SV)**؛ في هذا الفحص يقوم جهاز الفحص بتطبيق الفولتية بالتدرج وعادة ما يكون زمن هذا الفحص (**5 min**) دقائق ويمكن تغيرها.

مثال: إذا أردنا عمل هذا الفحص وقمنا بضبط الزمن على (**5 min**) دقائق والفولتية الفحص على (**5 kV**) كيلوفولت فإن جهاز الفحص سيقوم بحقن (**1 kV**) كيلوفولت لمدة دقيقة ثم يرفع الفولتية إلى (**2 kV**) كيلوفولت لمدة دقيقة وهكذا إلى أن يصل إلى (**5 kV**) كيلوفولت بعد (**5 min**) دقائق.

9.6 **الأسلوب السادس (Ramp Voltage)**؛ في هذا الفحص يقوم جهاز الفحص بحقن الفولتية بالتدرج على شكل (**Ramp**) وليس على شكل درجات كما هو الحال بالأسلوب السابق.

10. إختيار فولتية الفحص المناسبة وذلك من خلال تغير وضعية المفتاح المركزي المبين في الشكل (**2-1-4**).



الشكل رقم (**2-1-4**)

11. بدء الفحص (تطبيق الفولتية) وذلك بالضغط مطولاً على زر بدء الفحص (**Test**) الظاهرة في الشكل (**2-1-5**) لحين بدء الجهاز بحقن الفولتية، حيث تبدأ لمبة الإشارة الحمراء المبينة في الشكل (**2-1-2**) بالوميض المُتقطع (**Blinking**) طيلة مدة تطبيق الفولتية على المحول.



الشكل رقم (2-1-5)

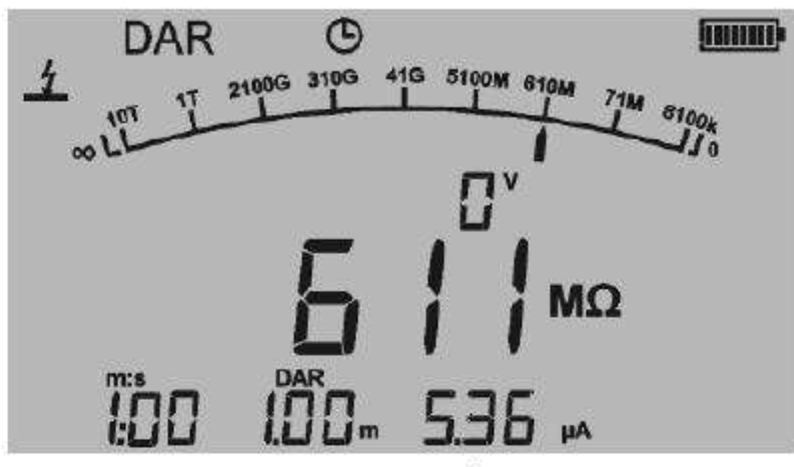
12. بعد إنتهاء مدة الفحص تظهر النتيجة على الشاشة ويقوم جهاز الفحص تلقائياً بعمل تفريغ للطاقة المختزنة في الملفات.

الشكل (2-1-6) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (IR) أو الـ(Spot Test).



الشكل رقم (2-1-6)

الشكل (2-1-7) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (DAR).



الشكل رقم (2-1-7)

الشكل (2-1-8) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (PI).



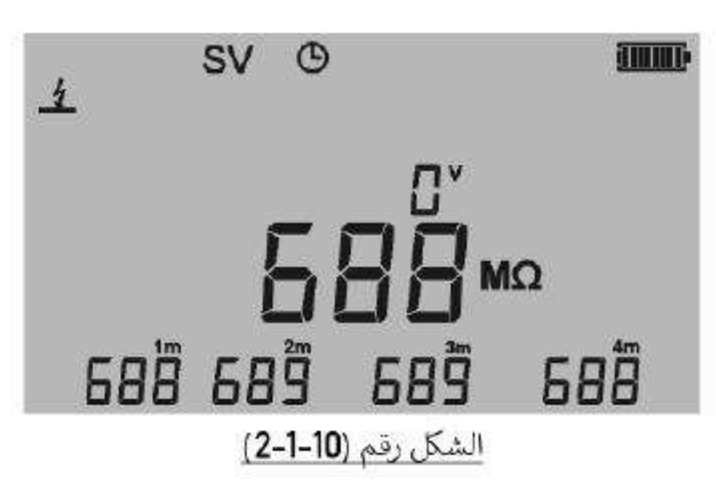
الشكل رقم (2-1-8)

الشكل (2-1-9) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (DD).



الشكل رقم (2-1-9)

الشكل (2-1-10) يُبين شاشة النتائج بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (SV).



الشكل رقم (2-1-10)



تحذير: وفي حال أردت إيقاف الفحص (حقن الفولتية) قبل إنتهاء وقت الفحص لأي سبب من الأسباب نقوم بالضغط على زر فحص (TEST).

الملحق (2-2)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط ، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة العزل بإستخدام جهاز
TeraOhmXA MI 3210 10kV by METREL

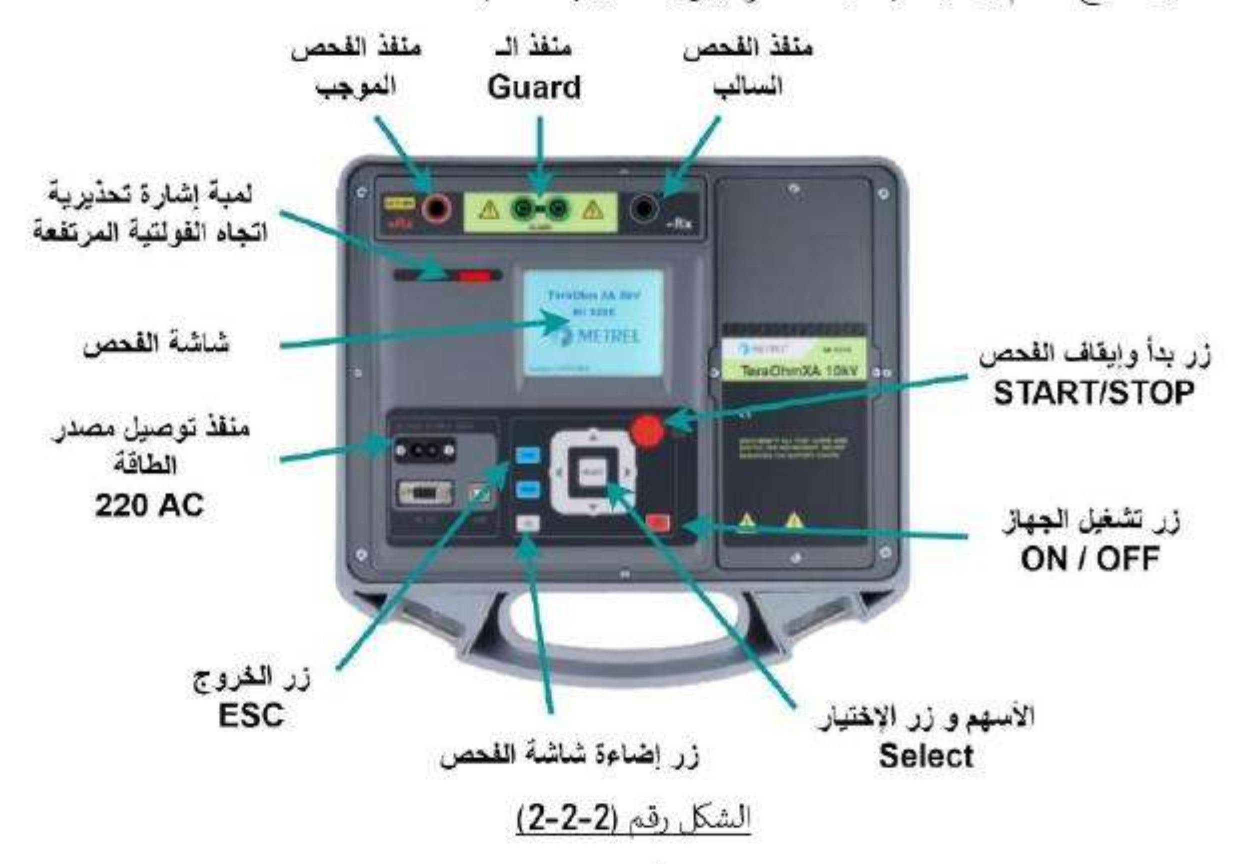


الشكل رقم (2-2-1)

- ## خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**7.1** إلى **7.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة العزل.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة و عدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. لا تقُم بلمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات تماماً.

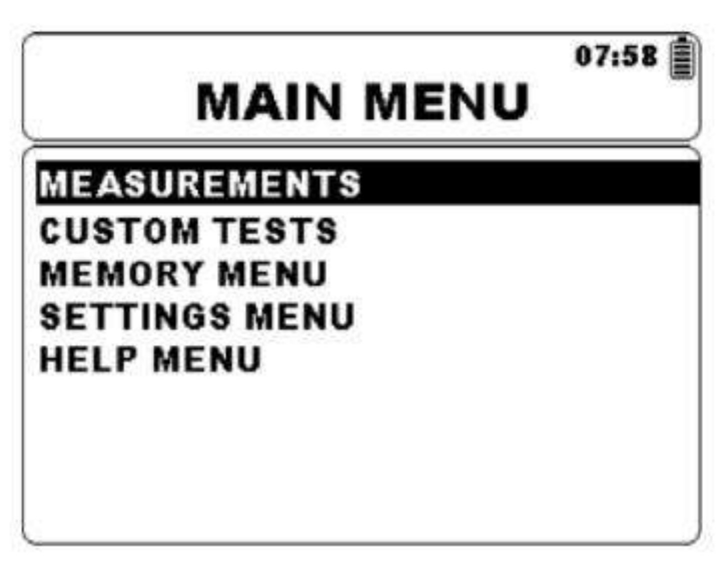
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك الـ (**Crocodile Clips**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تُعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور للعزل الخاص بها.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرُف على أجزاء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم و لمبات إشارة كما هو مُبين بالشكل (**2-2-2**).



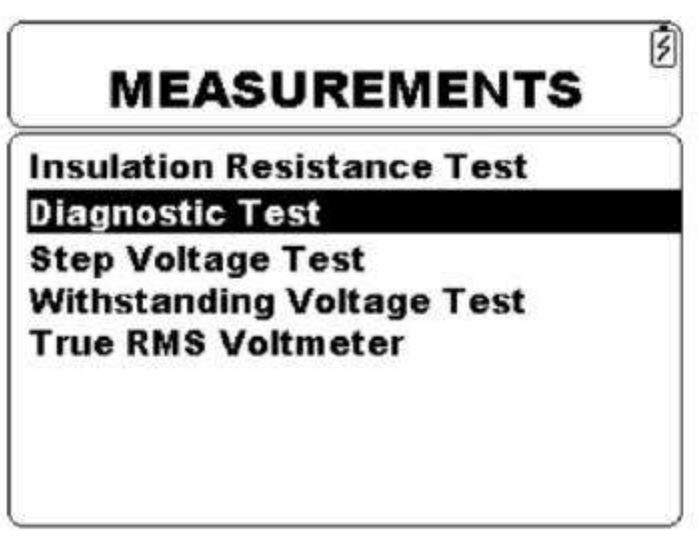
<u>الشكل رقم (**2-2-2**)</u>

7. إحضار جهاز الفحص إلى الموقع و توصيل الأسلاك الخاصة به على النحو التالي:
   - **7.1** توصيل جهاز الفحص بالمصدر الكهربائي (**Power cable**).
   - **7.2** توصيل السلك الأصفر والمُشار إليه بمقدمة حمراء اللون بالمكان المخصص له على الجهاز (**+Rx**) منفذ الفحص الموجب.
   - **7.3** توصيل السلك الأخضر بالمكان المخصص له على الجهاز (**Guard - G**) منفذ الفحص الأخضر.
   - **7.4** توصيل السلك الأصفر والمشار إليه بمقدمة سوداء بالمكان المخصص له على الجهاز (**-Rx**) منفذ الفحص السالب.
8. توصيل أسلاك جهاز الفحص (**Test Leads**) بأطراف المحول وذلك بالرجوع إلى الجداول (**2-2**) و (**2-3**) وكذلك الأشكال (**2-9**) إلى (**2-16**) من فصل فحص مقاومة العزل وذلك بعد إختيار التوصيلة المناسبة.

9. تشغيل الجهاز لتظهر القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (**2-2-3**) ونختار قياسات (**Measurements**) وذلك بتحديدها عبر الأسهم ثم الضغط على زر إختيار (**Select**) للإنتقال لنافذة القياسات (**Measurements**) و المبينة في الشكل (**2-2-4**).



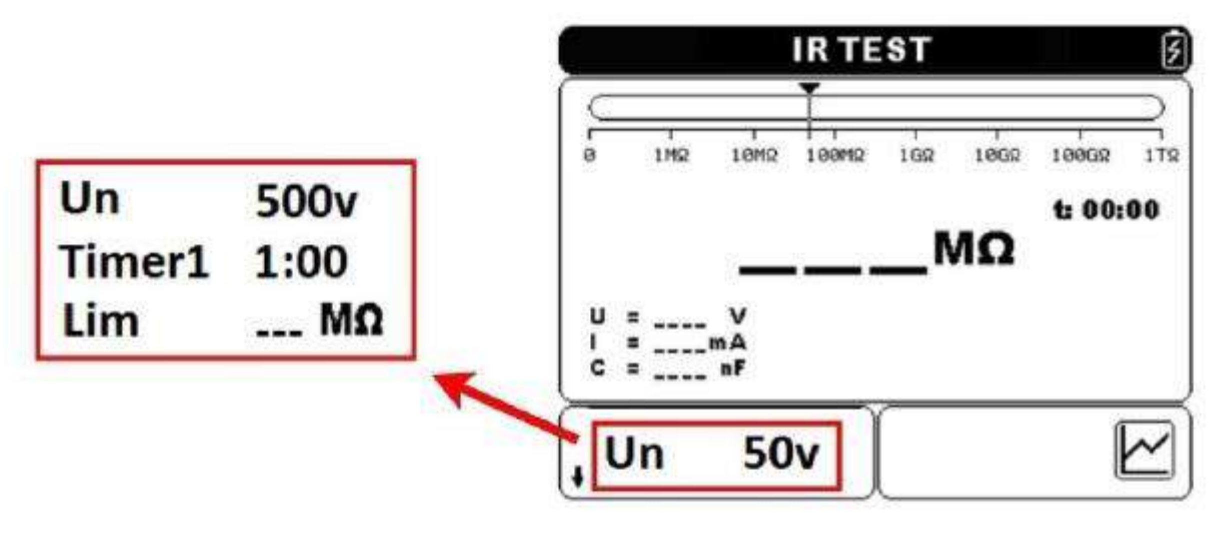
الشكل رقم (2-2-3)



الشكل رقم (2-2-4)

10. نقوم بإختيار واحدة من أساليب الفحص التالية:

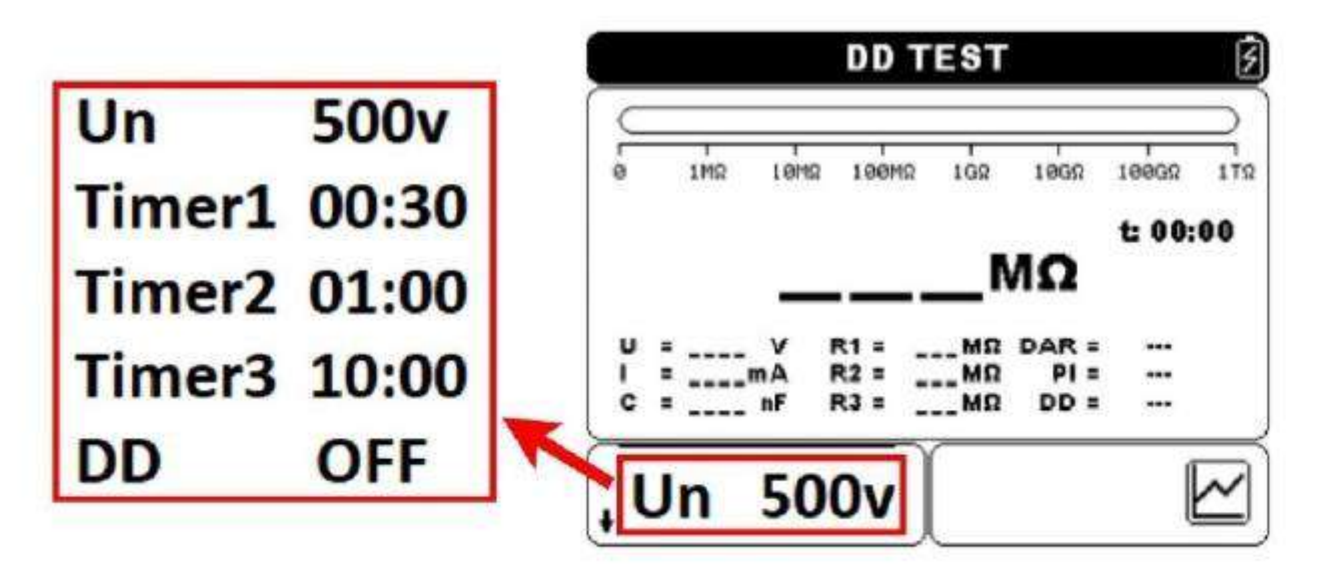
10.1 الفحص بأسلوب الزمن القصير (Spot Test)؛ نقوم بإختيار (**Insulation Resistance Test**) من نافذة القياسات (**Measurements**) المبينة في الشكل (**2-2-4**) بالضغط على زر (**Select**) للإنتقال للنافذة الخاصة بهذا الأسلوب و المبينة في الشكل (**2-2-5**).



الشكل رقم (2-2-5)

من الشكل (**2-2-5**) بإستخدام الأسهم الأربعة يتم تحديد فولتية الفحص (**Un**) و مدة الفحص (**Timer1**) و كذلك حد أعلى لقيمة الفحص (**Lim**) إذا أردت، و عادة ما تكون مدة الفحص دقيقة واحدة لهذا الأسلوب.

10.2الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR) و مؤشر الإستقطاب (PI) و أسلوب تفريغ العازل (DD)؛ نقوم بإختيار (**Diagnostic Test**) من نافذة القياسات (**Measurements**) المبينة في الشكل (**2-2-4**) بالضغط على زر (**Select**) لننتقل للنافذة الخاصة بهذا الأسلوب و المبينة في الشكل (**2-2-6**).



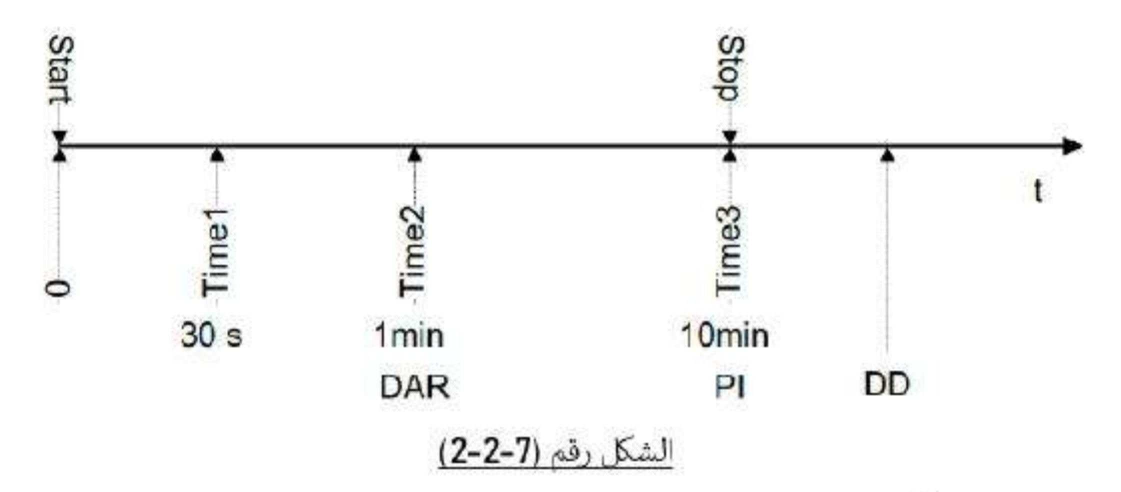
الشكل رقم (2-2-6)

إذا أردنا إجراء الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (**DAR or AI**) بإستخدام الأسهم نقوم بتحديد فولتية الفحص (**Un**) و الزمن (**Timer1**) و الزمن (**Timer2**)، و عادة ما يكون الزمن الأول

(**Timer1**) مقداره (**30 s**) و الزمن الثاني (**Timer2**) مقداره (**1 min**)، حيث في هذا الأسلوب تكون النتيجة حاصل قسمة (**Timer2**) على (**Timer1**).

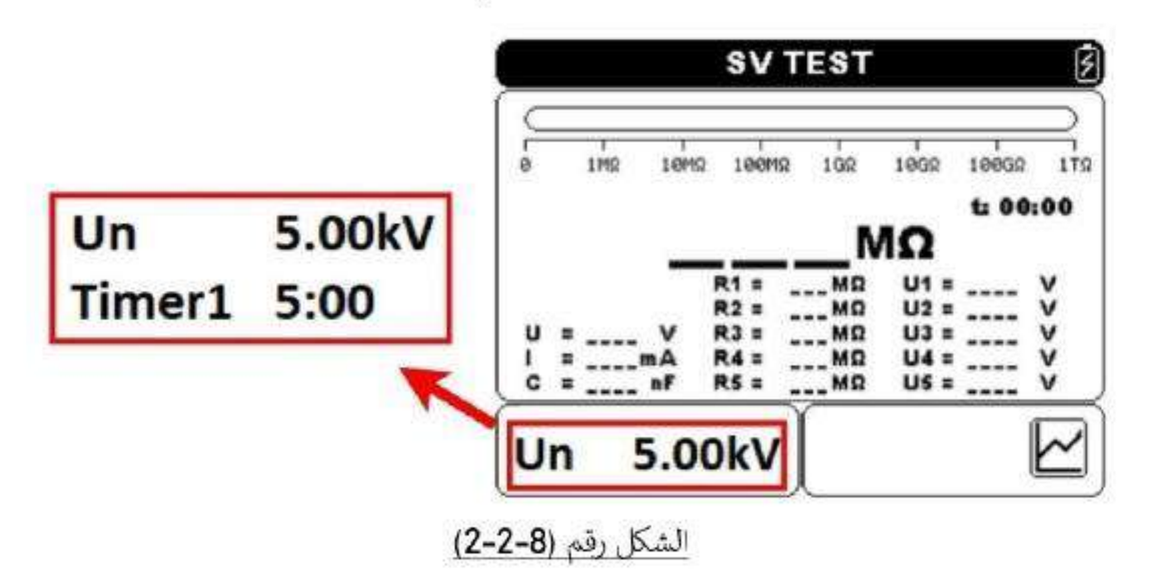
و إذا أردنا إجراء الفحص بأسلوب مؤشر الإستقطاب (**PI**) بإستخدام الأسهم نقوم بتحديد فولتية الفحص (**Un**) و الزمن (**Timer2**) و الزمن (**Timer3**)، و عادة ما يكون الزمن الأول (**Timer2**) مقداره (**1 min**) و الزمن الثالث (**Timer3**) مقداره (**10 min**)، حيث في هذا الأسلوب تكون النتيجة حاصل قسمة (**Timer3**) على (**Timer2**).

أما إذا أردنا إجراء الفحص بأسلوب تيار التفريغ (**DD**) بإستخدام الأسهم نقوم بتحديد فولتية الفحص (**Un**) و الزمن (**Timer2**) و الزمن (**Timer3**) و تفعيل هذا الأسلوب بجعل (**DD**) (**ON**)، و عادة ما يكون الزمن الثاني (**Timer2**) مقداره (**1 min**) و الزمن الثالث (**Timer3**) مقداره (**30 min**) أو إبقاؤه (**10 min**).



الشكل رقم (2-2-7)

10.3الفحص بأسلوب التدرج في الفولتية (SV)؛ نقوم بإختيار (**Step Voltage Test**) من نافذة القياسات (**Measurements**) المبينة في الشكل (**2-2-4**) بالضغط على زر (**Select**) للإنتقال للنافذة الخاصة بهذا الأسلوب و المبينة في الشكل (**2-2-8**).



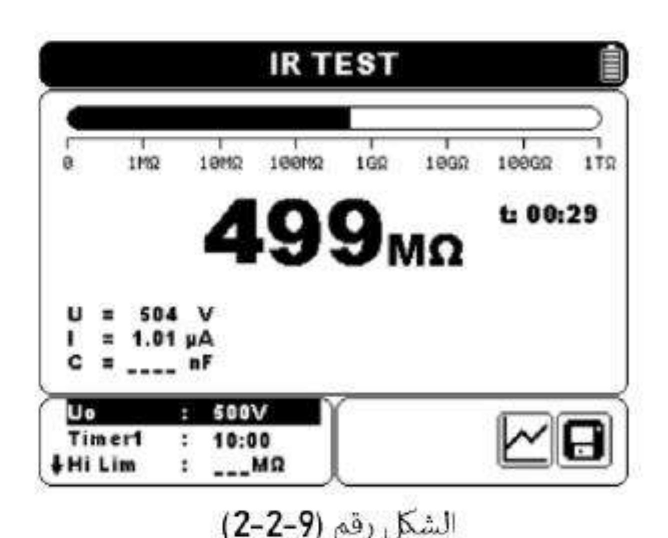
الشكل رقم (2-2-8)

مثال: إذا أردنا عمل هذا الفحص وقمنا بضبط الزمن على **(5 min)** دقائق والفولتية الفحص على **(5 kV)** كيلوفولت فإن جهاز الفحص سيقوم بحقن **(1 kV)** كيلوفولت لمدة دقيقة ثم يرفع الفولتية إلى **(2 kV)** كيلوفولت لمدة دقيقة وهكذا إلى أن يصل إلى **(5 kV)** كيلوفولت بعد **(5 min)** دقائق.

11. بدء الفحص (تطبيق الفولتية) وذلك بالضغط على زر **(Start/Stop)** المبين في الشكل **(2-2-2)** حيث تبدأ لمبة الإشارة الحمراء بالوميض المتقطع **(Blinking)** طيلة مدة تطبيق الفولتية.
12. بعد إنتهاء مدة الفحص تظهر النتيجة على الشاشة ويقوم جهاز الفحص تلقائياً بعمل تفريغ للطاقة المختزنة في الملفات.

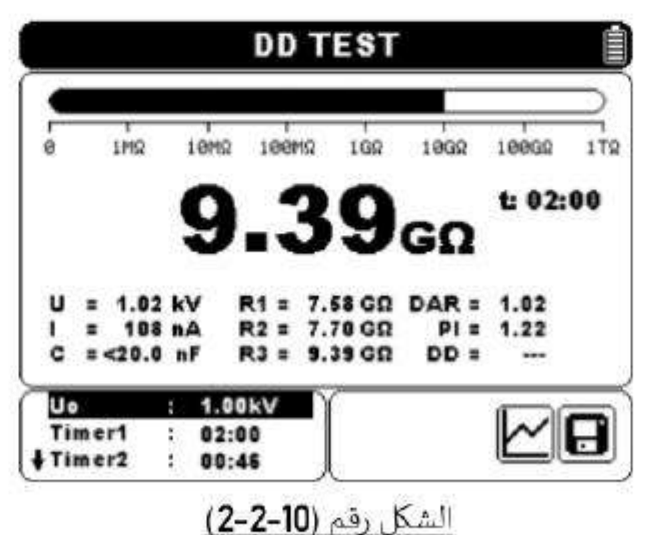
مثال: في حال إجراء الفحص بأسلوب الزمن القصير **(IR Spot Test)** يُمكن إيقاف الفحص بعد إستقرار قيمة مقاومة العزل بالضغط على زر **(Start/Stop)** أو بالإنتظار حتى إنتهاء مدة الفحص.

الشكل **(2-2-9)** يوضح شاشة النتائج للجهاز بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص **(IR)**.



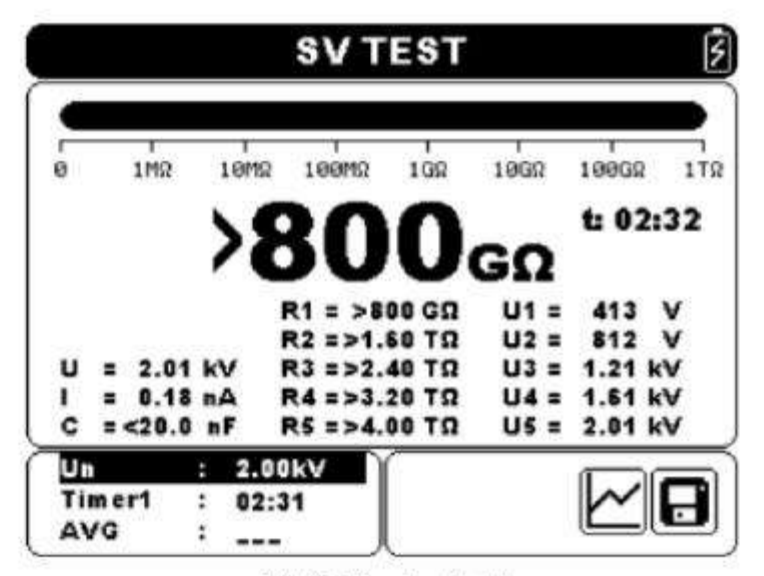
الشكل رقم (2-2-9)

الشكل **(2-2-10)** يوضح شاشة النتائج للجهاز بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص **(DAR & PI & DD)**.



الشكل رقم (2-2-10)

الشكل (**2-2-11**) يوضح شاشة النتائج للجهاز بعد إنتهاء الفحص بإستخدام أسلوب الفحص (**SV**).



الشكل رقم (**2-2-11**)

الملحق (3-2)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط ، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة العزل بإستخدام جهاز
1555 10kV Insulation Resistance Tester by FLUKE



الشكل رقم (1-3-2)

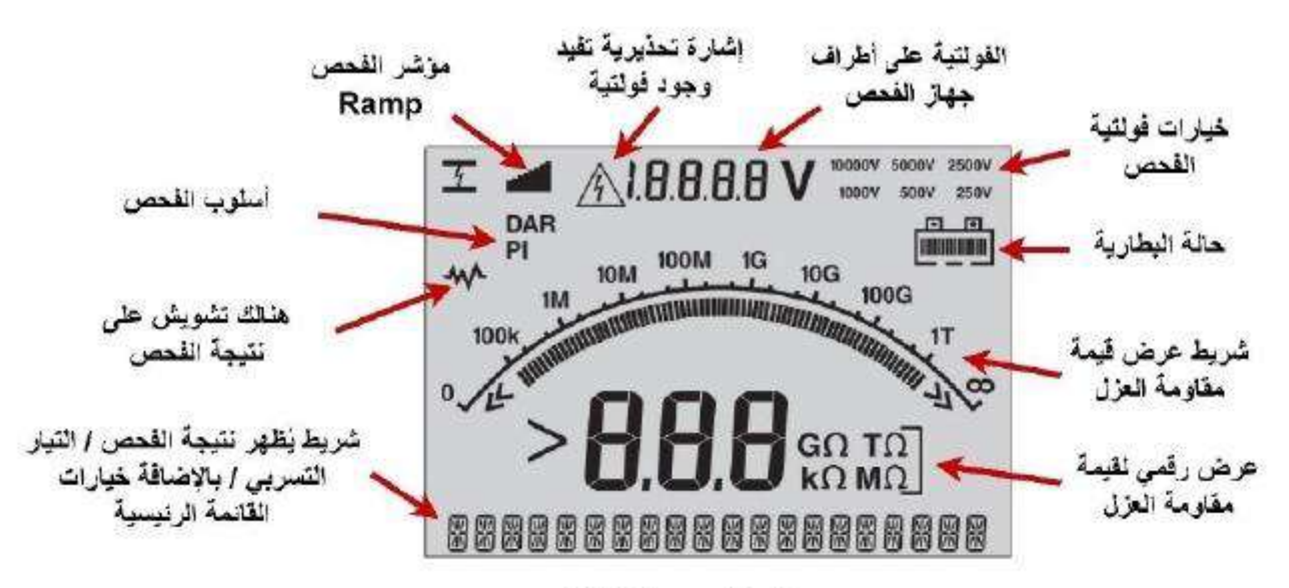
- ### خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**7.1** إلى **7.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة العزل.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة و عدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. لا تقُم بلمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك الـ(**Crocodile Clips**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تُعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور للعزل الخاص بها.

5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار تحكم بالإضافة لعناصر شاشة العرض لجهاز الفحص كما هو مبين بالشكل (**2-3-2&3**).



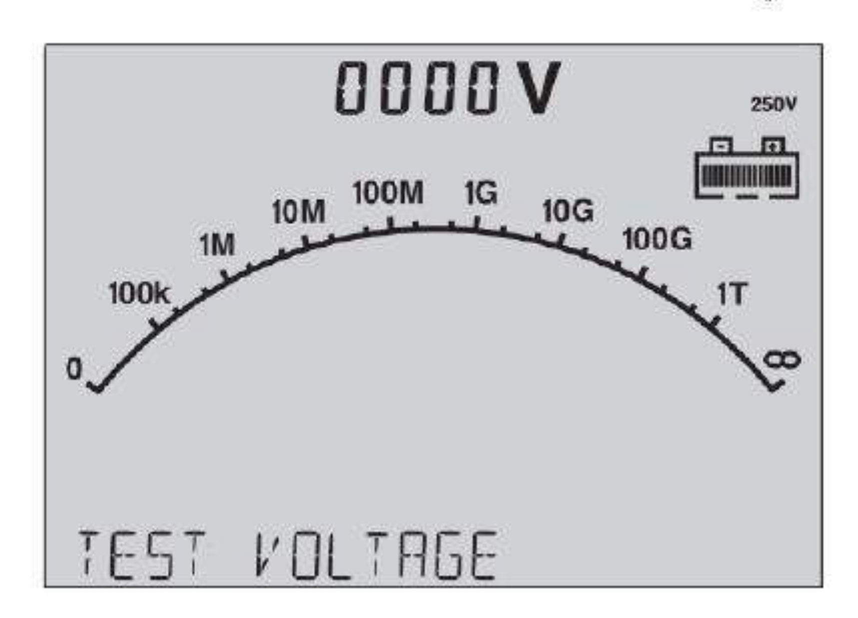
الشكل رقم (**2-3-2**)



الشكل رقم (**2-3-3**)

7. إحضار جهاز الفحص إلى الموقع و توصيل الأسلاك الخاصة به على النحو التالي:
   7.1 توصيل السلك الأحمر بالمكان المخصص له على الجهاز (**+**) منفذ الفحص الموجب.
   7.2 توصيل السلك الأخضر بالمكان المخصص له على الجهاز (**Guard**) منفذ الفحص الأخضر.
   7.3 توصيل السلك الأسود بالمكان المخصص له على الجهاز (**-**) منفذ الفحص السالب.

8. توصيل أسلاك جهاز الفحص (**Test Leads**) بأطراف المحول وذلك بالرجوع إلى الجداول (**2-2**) و (**2-3**) وكذلك الأشكال (**2-9**) إلى (**2-16**) من فصل فحص مقاومة العزل وذلك بعد إختيار التوصيلة المناسبة.
9. تشغيل الجهاز بالضغط على زر التشغيل (**On/Off**) الموضح في الشكل (**2-3-2**) لتظهر الشاشة الرئيسية المبينة في الشكل (**2-3-4**).



الشكل رقم (**2-3-4**)

10. التأكد من أن جهاز الفحص مشحون وأن البطارية مُكتملة، بحيث يُمكن ملاحظة ذلك من شاشة الفحص المبينة في الشكل (**2-3-4**).

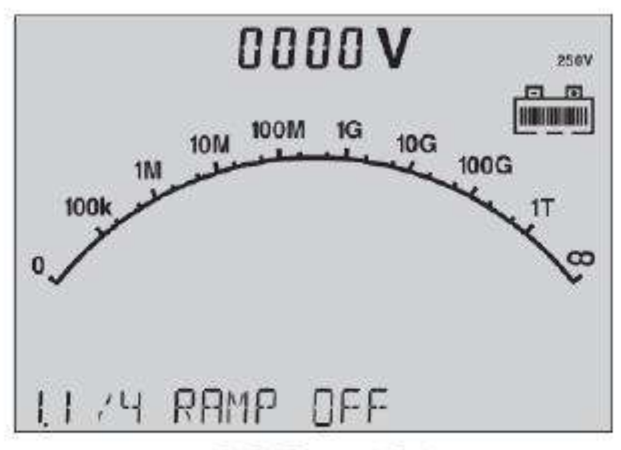
11. **تحديد فولتية الفحص:**

من الشاشة الرئيسية الظاهرة في الشكل (**2-3-4**) والتي تكون بالبداية على وضعية تحديد فولتية الفحص (**TEST VOLTAGE**) نقوم بتحديد الفولتية مباشرة بواسطة الأسهم وذلك لإختيار واحدة من القِيَم التالية (**250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000**) فولت، أو بالضغط على زر إدخال (**Enter**) ومن ثم بواسطة الأسهم نقوم بإختيار فولتية الفحص عبر زيادة أو إنقاص (**50 V**) فولت بكل ضغطة سهم لأعلى أو لأسفل ومن ثم يتم الضغط على زر إدخال (**ENTER**) لتثبيت الفولتية المُرادة والرجوع للقائمة الرئيسية.

12. **إختيار أسلوب الفحص المناسب كالآتي:**

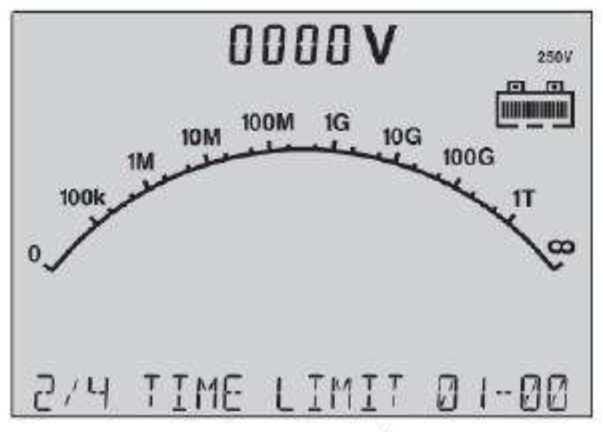
12.1 الفحص بأسلوب الزمن القصير (Spot Test):

من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (**2-3-3**) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالإنتقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (**Function**) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (**2-3-5**).



الشكل رقم (2-3-5)

بعد ذلك نقوم بالضغط على السهم لأعلى للإنتقال للخيار (**2/4 TIME LIMIT OFF**) ومن ثم الضغط على زر إدخال (**ENTER**) ثم بواسطة الأسهم نقوم بتحديد زمن الفحص المناسب بالدقائق ومن ثم الضغط على زر إدخال (**ENTER**) مرة أخرى كما هو مبين في الشكل (**2-3-6**) والتي يُظهر زمن الفحص المضبوط على دقيقة واحدة فقط.



الشكل رقم (2-3-6)

وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضغط مطولاً على زر بدأ الفحص (**TEST**) المبين في الشكل (**2-3-2**) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مبين بالشكل (**2-3-7**).

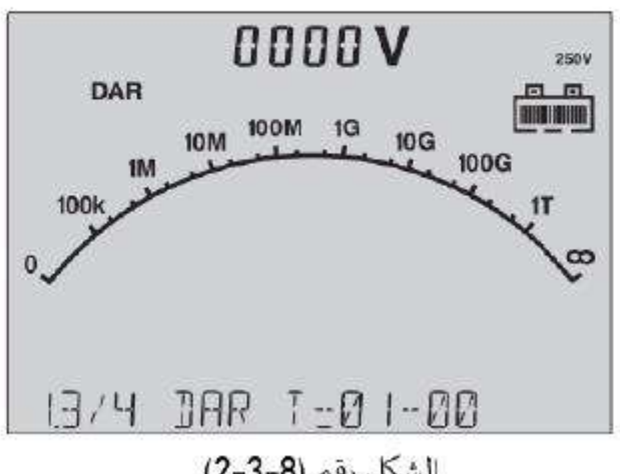


الشكل رقم (2-3-7)

حيث يُمكن حفظ نتيجة الفحص بالضغط على السهم لأعلى.

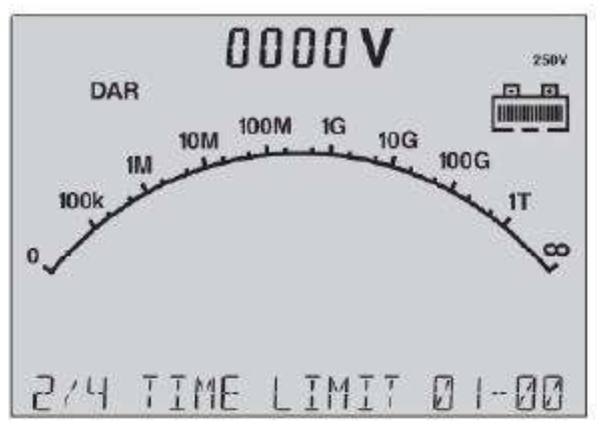
12.2 الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR)؛

من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (**2-3-3**) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالإنتقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (**Function**) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (**2-3-5**)، وبعدها نقوم بالضغط على زر إدخال (**ENTER**) وبإستخدام الأسهم نحدد الخيار (**1.3/4 DAR T = 1**) ومن ثم نقوم بالضغط على زر إدخال (**ENTER**) لإختياره كما هو مبين بالشكل (**2-3-8**).



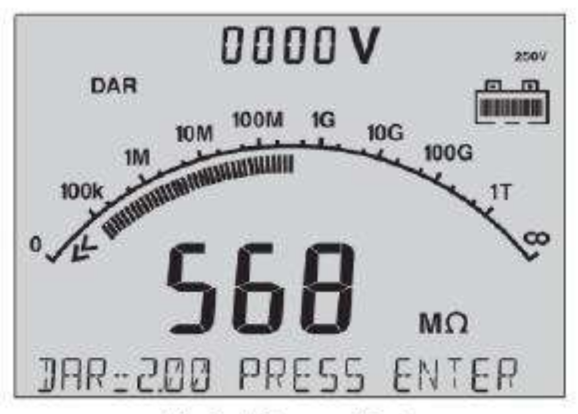
الشكل رقم (**2-3-8**)

بعدها تظهر الشاشة المبينة في الشكل (**2-3-9**) والتي من خلالها يُمكن ضبط زمن الفحص والذي يتم ضبطه عادة على دقيقة واحدة.



الشكل رقم (**2-3-9**)

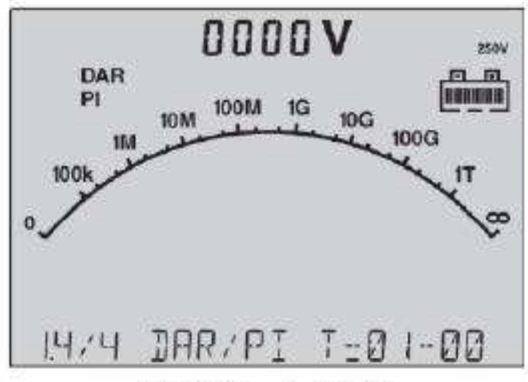
وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضغط مطولاً على زر بدأ الفحص (**TEST**) المبين في الشكل (**2-3-2**) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مبين بالشكل (**2-3-10**).



الشكل رقم (2-3-10)

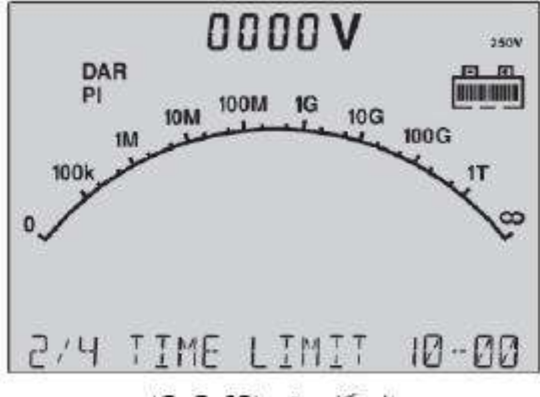
12.3 الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR) ومؤشر الإستقطاب (PI) معاً؛

من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (**2-3-3**) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالإنتقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (**Function**) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (**2-3-5**)، وبعدها نقوم بالضغط على زر إدخال (**ENTER**) وبإستخدام الأسهم نحدد الخيار (**1.4/4 DAR/PI T = 10**) ومن ثم نقوم بالضغط على زر إدخال (**ENTER**) لإختياره كما هو مبين بالشكل (**2-3-11**).



الشكل رقم (2-3-11)

بعدها تظهر الشاشة المبينة في الشكل (**2-3-12**) والتي من خلالها يُمكن ضبط زمن الفحص والذي يتم ضبطه عادة على عشر دقائق.



الشكل رقم (2-3-12)

وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضغط مطولاً على زر بدأ الفحص (**TEST**) المبين في الشكل (**2-3-2**) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مبين بالشكل (**2-3-13**).



الشكل رقم (**2-3-13**)

12.4 الفحص بأسلوب مؤشر الإمتصاص (DAR) وفقاً للمعايير الصينية؛

تختلف المعايير الصينية عن باقي المعايير فيما يخص هذا الاسلوب حيث يكمن الإختلاف في العادلة الخاصة لإحتساب مؤشر الإمتصاص (**DAR**)، حيث أن المعايير الصينية تعتمد المعادلة التالية:

$$DAR\ or\ AI = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} = \frac{I_{15s}}{I_{60s}} \qquad (2.3.1)$$

حيث؛

$DAR\ or\ AI$	: مؤشر الإمتصاص – **Dielectric Absorption Ratio or Absorption Index.**
R_{60s}	: قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**MΩ**).
R_{15s}	: قيمة مقاومة العزل عند الثانية (**15s**) من الفحص (**MΩ**).
I_{15s}	: قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند االثانية (**15s**) من الفحص (**µA**).
I_{60s}	: قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**µA**).

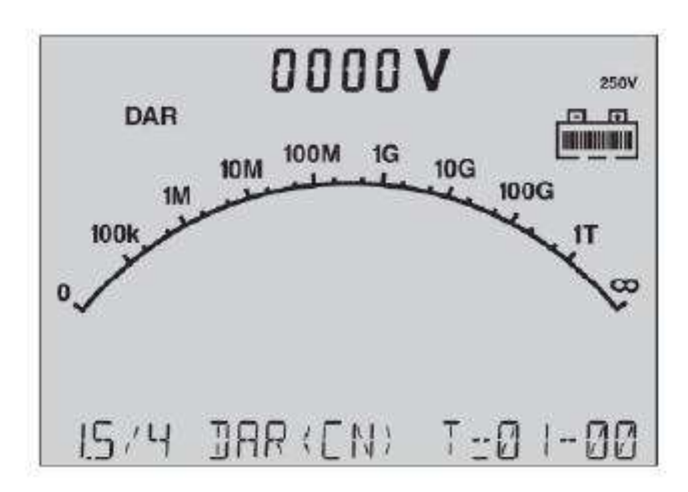
أما اغلب المعايير والمراجع فقد إعتمدت المعادلة التالية:

$$DAR\ or\ AI = \frac{R_{60s}}{R_{30s}} = \frac{I_{30s}}{I_{60s}} \qquad (2.3.2)$$

حيث؛

$DAR\ or\ AI$	: مؤشر الإمتصاص – **Dielectric Absorption Ratio or Absorption Index.**
R_{60s}	: قيمة مقاومة العزل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**MΩ**).
R_{30s}	: قيمة مقاومة العزل عند الثانية (**30s**) من الفحص (**MΩ**).
I_{30s}	: قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند االثانية (**30s**) من الفحص (**µA**).
I_{60s}	: قيمة التيار المُتسرب من خلال العازل عند الدقيقة الأولى من الفحص (**µA**).

ولإختيار الفحص نقوم بالآتي من القائمة الرئيسية المبينة في الشكل (**2-3-3**) وبعد تحديد فولتية الفحص المناسبة نقوم بالإنتقال لقائمة الخيارات الأخرى وذلك بالضغط على زر (**Function**) لتظهر لنا الشاشة المبينة في الشكل (**2-3-5**)، وبعدها نقوم بالضغط على زر إدخال (**ENTER**) وبإستخدام الأسهم نحدد الخيار (**1.5/4 DAR (CN) T = 1**) ومن ثم نقوم بالضغط على زر إدخال (**ENTER**) لإختياره كما هو مبين بالشكل (**2-3-14**).

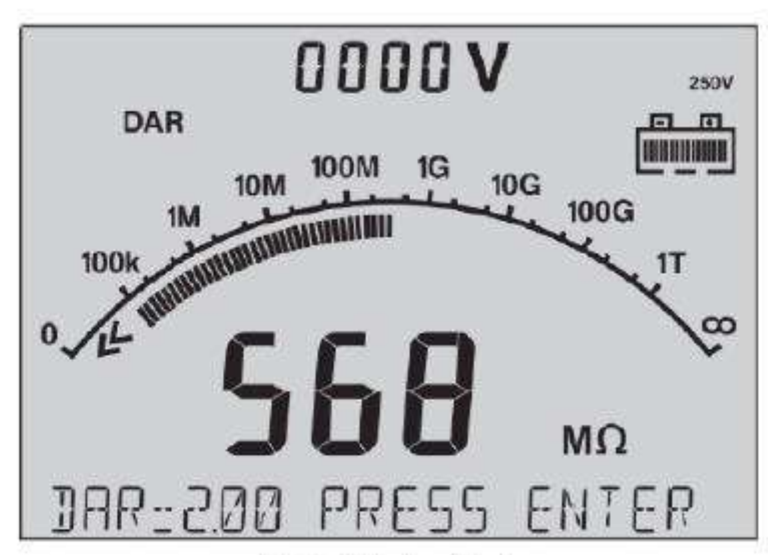


الشكل رقم (**2-3-14**)

بعدها تظهر الشاشة المبينة في الشكل (**2-3-9**) والتي من خلالها يُمكن ضبط زمن الفحص والذي يتم ضبطه عادة على دقيقة واحدة. وبذلك نكون جاهزين لبدأ الفحص بالضغط مطولاً على زر بدأ الفحص (**TEST**) المبين في الشكل (**2-3-2**) لتظهر نتيجة الفحص كما هو مُبين بالشكل (**2-3-15**).

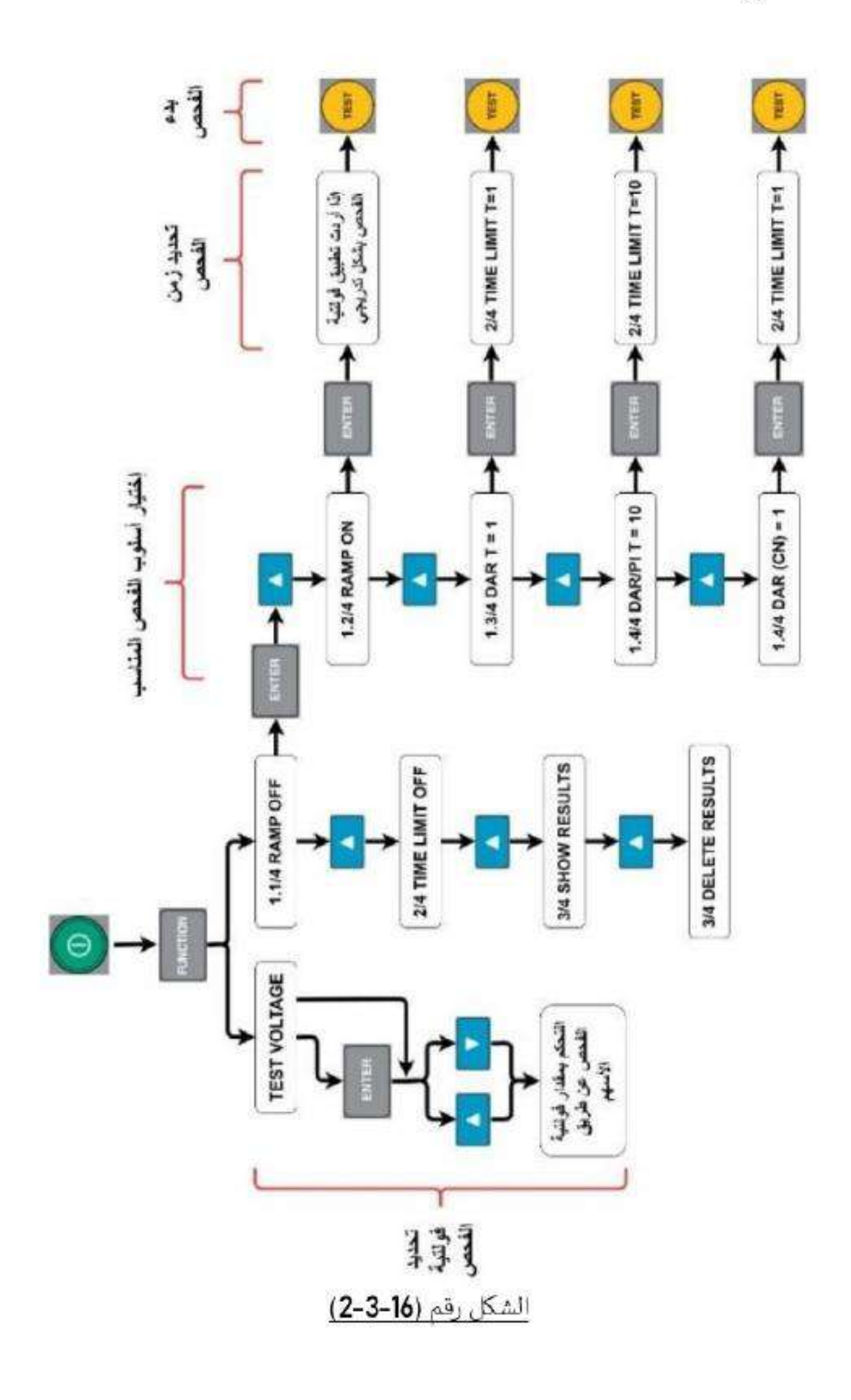


تحذير: وفي حال أردت إيقاف الفحص (حقن الفولتية) قبل إنتهاء وقت الفحص لأي سبب من الأسباب نقوم بالضغط على زر فحص (**TEST**).



الشكل رقم (**2-3-15**)

الشكل (**2-3-16**) يبين مخطط شجري لتسهيل تصفح الخيارات داخل الجهاز وللمساعدة في ضبط إعدادات الفحص.



الشكل رقم (**2-3-16**)

الفصل الثالث

فحص مقاومة الملفات

Winding Resistance Test (WR)



فحص مقاومة الملفات
Winding Resistance Test

يُعبّر فحص مقاومة ملفات المحول (**Winding Resistance Measurement – WRM**) عن مقاومة المسار الحامل للتيار داخل المحول - الملفات النحاسية في أغلب الأحيان -، هذه المقاومة التي تُعطي تصوّر عن الحالة الداخلية للملفات كوجود قطع كُلّي أو جزئي للملفات أو غيرها من الأضرار الفيزيائية التي قد تلحق بالملفات أو مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**)، كما ويُمكن إستخدام قيمة هذه المقاومة في حساب الضياعات المادية أو النحاسية سابقة الذكر لهذا المحول. ويُطلق أيضاً على هذا الفحص إسم (**Static Cold Resistance Measurement**) وتم وضع كلمة (**Static**) للدلالة على أن هذا الفحص يَجري بالوضع الإستاتيكي أي بدون وجود حركة وكذلك للتفرقة بينه وبين فحص ال(**Dynamic**) والذي يتم من خلاله قياس قيمة المقاومة أثناء حركة مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) من النوع (**OLTC**) للتأكد من سلامته، وفيما يَخُص كلمة (**Cold**) فهي للدلالة على أن هذا الفحص يتم إجراؤه بعد وصول المحول إلى حالة الإستقرار الحراري كما سيتم شرحه لاحقاً في هذا الفصل.

وكما هو معلوم وعند إختيار الموصلات الخاصة بملفات المحول فيما إذا كانت نحاسية أو من الألمنيوم فإن قيمة المقاومة الكهربائية (**Resistance**) من القِيَم الهامة و المحورية، حيث تُعد من القِيَم المؤثرة في التحكم بكمية التيار المار في الملفات وفقاً لقِيَم التيار التصميمية بالإضافة إلى التحكم بمستوى ضياعات الحمل (**Load Losses**) لهذا المحول، وقياس هذه المقاومة بشكل دوري يَقي من حدوث عَطَب للمحول على المدى الطويل ويُقلل من الطاقة الضائعة على شكل حرارة نتيجة للزيادة في قيمة هذه المقاومة. كما و يُعتبر هذا الفحص من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**) أي أنه لا يُؤثر على سلامة العزل وذلك لأن مقدار فولتية الفحص أقل من مقدار الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول.

وتتلخص سلامة أي محول في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أيٍ من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكن من الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي والحراري للمحول وذلك بالكشف عن الأعطال التي تَحدث للمسار الحامل للتيار داخل المحول كالملفات (**Winding**) أو مُغيّر الخطوة (**Tap changer**).

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعُنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أُخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المَصنعيّة (**Quality Control - QC**) وكذلك يُعتبر من فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهربة المحول للمرة الأولى (**Transformer first energization**) كأحد فحوصات القُبول المَوقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد عمليات الصيانة المُختلفة في الموقع.

1.4 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) من نوع (**De-energized Tap Changer DETC or OCTC**) وذلك لضمان عدم وجود فتح بدائرة الملفات الداخلية للمحول (**Open circuit**).

1.5 لحساب مُركّبة الضياعات المادية أو النحاسية (I^2R) للموصلات الخاصة بالمحول ومعرفة الكفاءة، حيث تُشكل هذه المُركّبة الجزء الأكبر من قيمة ضياعات الحمل (**Load Losses**).

1.6 قبل فحص إرتفاع الحرارة (**Temperature Rise**) حيث تُستخدم قيمة هذا الفحص – مقاومة الملفات - لحساب درجة حرارة الملفات في نهاية فحص الـ(**Temperature Rise**).

1.7 بشكل روتيني (**Routine test**) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (**Reference value**).

1.8 تحديد الأعطال داخل المحول (**Fault detection – Diagnostic test**)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

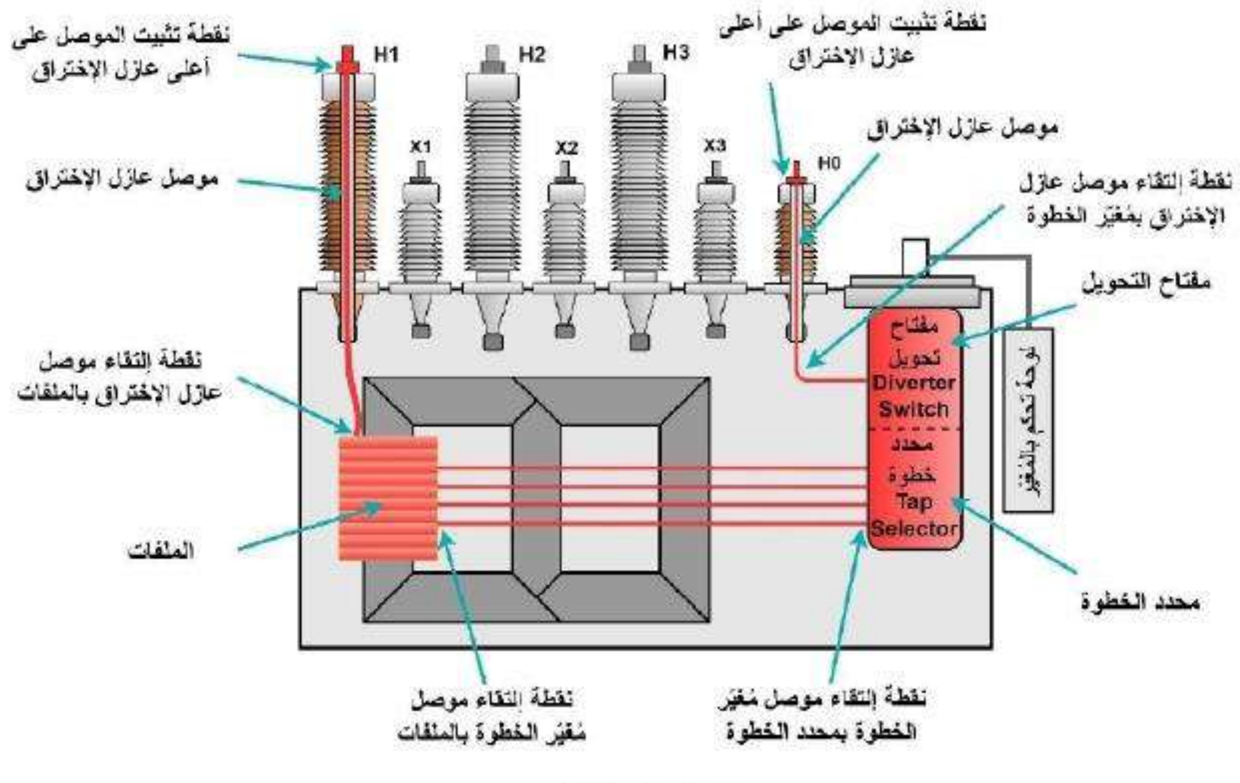
يتم اللجوء لعمل هذا الفحص في حال إرتفاع درجة حرارة ملفات المحول أو حدوث فصل قسري للمحول (**Trip**) نتيجة لإرتفاع درجة الحرارة أو في حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الذائبة في الزيت (**Dissolved Gas Analysis - DGA**) خاصة عند ظهور غازات الـ(الميثان – CH_4 و الإيثان – C_2H_6 و الإيثيلين – C_2H_4) مُجتمعة والتي يُطلق عليها غازات إحماء المعدن (**Hot metal gases**) والناتجة عن إحماء المسار الحامل للتيار في المحول كالنحاس أو الألمنيوم.

كما ويُعدّ تعرُّض المحول لإجهاد ميكانيكي كالإهتزازات أو النقل أو الصدمات، بالإضافة إلى تعرُّض المحول إلى إجهاد ناتج عن عطل كهربائي مثل الاعطال الأرضية (**Earth Faults**) وما ينتج عنها من تيارات قِصَر ذات قِيَم مرتفعة من الأمور التي تدفعُنا لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود قطع كُلي أو جُزئي في ملفات المحول (**Open circuit or Crack**)، مما يؤدي لإرتفاع قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.
- وجود قِصَر (**Short circuit**) بين لفات الملفات المختلفة من المحول أو بين اللفات من نفس الملف، مما يؤدي لإنخفاض قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.
- وجود نقاط توصيل رديئة (**Poor electrical connections**) في المحول، مثل وجود إرتخاء (**Loose**) في نقاط توصيل موصلات عوازل الإختراق أو كما تُسمى جُلَب المحول (**Bushing leads**) بملفات المحول، أو وجود إرتخاء في نقاط توصيل ملفات المحول بمُغيّر الخطوة (**Tap changer**)، مما يؤدي لإرتفاع قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.
- عطل داخلي في عمل مُغيّر الخطوة (**Tap Changer**) أو تآكل أو تأكسد ملامساته، مما يؤدي لإرتفاع قيمة المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص.

ويُبين الشكل (**1-3**) مثال على المسار الحامل للتيار داخل المحول أثناء إجراء هذا الفحص والذي يُبين أهم المناطق التي يستهدفها هذا الفحص والموضحة باللون الأحمر، حيث تُمثّل نقاط الإلتقاء المُشار إليها في الشكل المناطق الأكثر شيوعاً كمسببات لإرتفاع قيمة مقاومة الملفات إلى جانب مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) نفسه.



الشكل رقم (**1-3**)

3. فلسفة الفحص

قبل الخوض في تفاصيل الفحص لا بُد من الإجابة عن تساؤل هام وهو "ما الفرق بين المقاومة المُقاسة من خلال هذا الفحص وهي مقاومة التيار الثابت (**DC Resistance**) ومقاومة التيار المُتردد (**AC Resistance**) التي يتم قياسها بإستخدام تيار وفولتية مترددة أو أثناء التحميل الطبيعي للمحول؟"

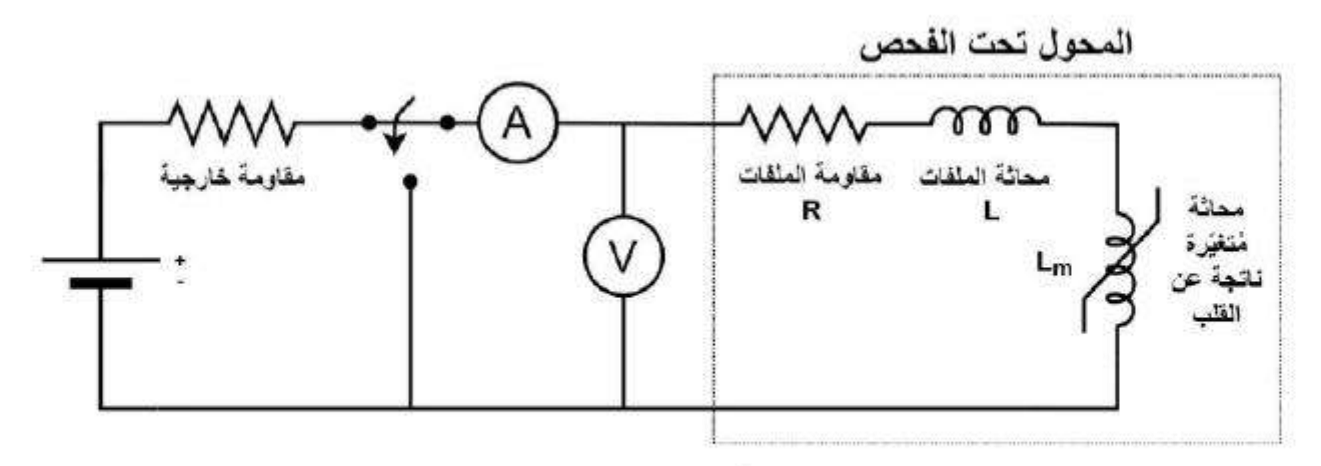
كما هو معلوم أن مقاومة التيار المتردد للمحول (**AC Resistance**) تتكون من مُركّبتين إحداهما تُمثّل الجزء المادي من المقاومة (R)، والأُخرى تُمثّل الجزء التَخيُّلي أو ما يُسمى بالـ(**Imaginary part**) وهي المُفاعلة الحثية (XL)، ومنه فإن هذه المقاومة تَدُل على كثير من المعلومات الخاصة بمُركبات ضياعات الحمل داخل المحول من ضياعات مادية أو نحاسية (**Resistive or Copper Losses**) بالإضافة إلى الضياعات الشاردة (**Stary Losses**) والمُتمثلة بضياعات التيارات الدوامية في الملفات (**Winding Eddy Losses**) وضياعات التيارات الدوّارة في الموصلات المتوازية (**Parallel Conductors Circulating Current Losses**) وأيضاً الضياعات الشاردة في الخزان (**Tank Stray Losses**)، أما من الناحية التشخيصية وفيما يَخُص هذا الفحص فإن هذه المقاومة (**AC Resistance**) لا يُمكن الإستفادة منها هنا البتة، مع العلم أن هذه المقاومة يتم إستخراجها والإستفادة منها في فحوصات أُخرى مثل فحص الإستجابة الترددية للضياعات الشاردة (**Frequency Response of Stray Losses - FRSL**).

أما فيما يَخُص المقاومة المُقاسة في هذا الفحص فهي مقاومة التيار الثابت (**DC Resistance**) والتي تَدُل على الضياعات المادية أو النحاسية (**Copper Losses -** I^2R) فقط، وكذلك تُعطي تَصوّر عن وضع الموصلات الراهن وهو ما نرجوه من هذا الفحص.



ملحوظة (3-1): إن مقاومة التيار المتردد (**AC Resistance**) تحوي بداخلها أيضاً مقاومة التيار الثابت (**DC Resistance**) لذلك تكون قيمتها أكبر قليلاً.

لقياس قيمة مقاومة التيار الثابت (**DC Resistance**) فإن الطريقة المُتعارف عليها هي بحقن تيار ثابت (**DC current**) وقياس الهبوط بالفولتية على أطراف المقاومة ومن ثم حساب هذه المقاومة وفقاً لقانون أوم (**Ohm's Law**)، ولكن هذه الطريقة يُمكن تطبيقها بكفاءة عالية وسهولة عند قياس مقاومة مادية فقط (R). أما إذا إقترن وجود هذه المقاومة بوجود محاثة (**Inductance**) فإن ذلك من شأنه زيادة الأمر صعوبة خاصة إذا كانت هذه المحاثة ذات قلب حديدي كما هو الحال في المحولات وكما هو موضح بالشكل (**3-2**).



الشكل رقم (3-2)

نتيجة لذلك هنالك عاملان رئيسيان يُعيقان القيام بهذا الفحص بسهولة ويُسر وهما:

- ✓ التغيُّر في قيمة التيار مع الزمن عند بداية الفحص نتيجة لوجود محاثة الملفات (**Winding Self Inductance** - L) والتي تُقاوم مرور هذا التيار بالبداية ثم تستقر قيمته بعد ذلك.
- ✓ التغيُّر في قيمة المحاثة الناتجة عن القلب الحديدي للمحول مع الزمن (**Mutual Inductance** - L_m) والناتج عن عدم تَشبُّع (**Saturation**) القلب الحديدي للمحول.

وهذان العاملان ينتج عنهما مُركبتين لهبوط الفولتية (**Drop Voltage**) تُضافان إلى الهبوط في الفولتية على أطراف المقاومة (RI) وهي القيمة المطلوبة فقط، مما يجعل قياس مقاومة هذه الملفات غير دقيق نتيجة لتذبذب قيمة الفولتية كما هو مُبين بالمعادلة التالية.

$$V = R\,I + \ L\ \frac{dI(t)}{dt} + I\ \frac{dL_m(t)}{dt} \qquad (3.1)$$

حيث؛

$R\,I$: تُمثّل مُركبة الهبوط في الفولتية الناتج عن المقاومة وهي القيمة المطلوبة لحساب هذه المقاومة.

$L\,\frac{dI(t)}{dt}$: تُمثّل مُركبة الهبوط في الفولتية الناتجة عن التغيُّر في قيمة التيار نتيجة وجود محاثة الملفات (L).

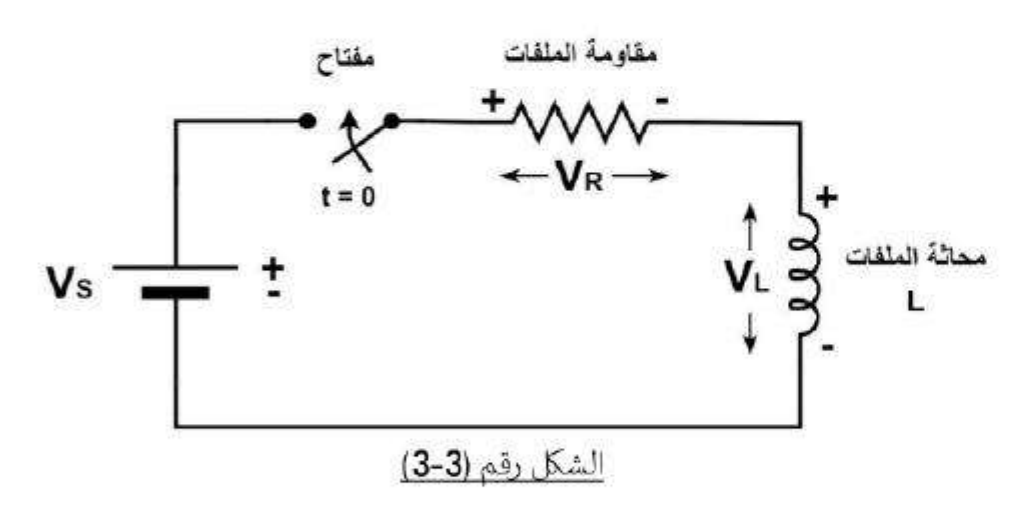
$I\,\frac{dL_m(t)}{dt}$: تُمثّل مُركبة الهبوط في الفولتية الناتجة عن التغيُّر في قيمة المحاثة المُشتركة الناتجة عن عدم تشبُّع القلب الحديدي للمحول (L_m).

لذلك يُعد فحص مقاومة ملفات المحول من الفحوصات التي لا يُمكن إيجاد قيمتها لحظياً، بل يجب التخلُّص من قيمة المحاثة الناتجة عن القلب الحديدي والوصول إلى قيمة تيار فحص ثابتة حتى يتسنى لنا أخذ القراءة بنسبة خطأ تؤول للصفر.

ولزيادة الفهم سيتم شرح هذه العوامل المؤثرة على الفحص:

- **العامل الأول: المُركّبة الناتجة عن التغيُّر في قيمة التيار مع الزمن عند بداية الفحص.**

يُمكن التعبير عن ملفات المحول بشكل بسيط - على إعتبار أن القلب هوائي - على أنها مقاومة موصولة على التوالي مع محاثة (**Series R-L circuit**) بحيث تكون قيمة المقاومة والمحاثة ثابتة مع الزمن كما هو مُبين بالشكل (**3-3**).



الشكل رقم (**3-3**)

وبالتالي وكما هو معلوم فإن محاثة الملفات (L) في حالة التيار الثابت (**DC**) يُمكن تمثيلها على شكل وصلة قِصَر (**Short Circuit**) أي أنها بلا تأثير على الدائرة ولكن هذا الكلام غير دقيق **100**%، فبالرجوع الى الدائرة المُبينة في الشكل (**3-3**) وعند إغلاق المفتاح عند ($t = 0$) وتطبيق الفولتية على المقاومة والمحاثة فإن قيمة التيار تكون مساوية للصفر وتبدأ بالإرتفاع تدريجياً حتى الوصول إلى إلى قيمة مُعيّنة والثبات، ويَعود ذلك بسبب الفولتية المُعاكسة المُتولدة من المحاثة وفقاً لقانون لينز بسبب تصاعد قيمة الفيض المغناطيسي في البداية وهذا ما يُسمى بالـ(**Back Electro-Motive Force – BackEMF**)، ويُمكن أن نرمز لهذه الفولتية المتولدة على أطرف المحاثة بـ(V_L) والتي تُعاكس الفولتية الرئيسية المُطبقة على الدائرة (V_S) وتساويها بالمقدار مما يجعل الفولتية على أطراف المقاومة (V_R) مساوية للصفر في لحظة إغلاق المفتاح، وبعد ذلك تبدأ الفولتية المُعاكسة على أطراف المحاثة (V_L) بالهبوط والفولتية على أطراف المقاومة (V_R) بالإرتفاع إلى أن تصل الفولتية على أطراف المحاثة للصفر بعد فترة من الزمن وتصبح الفولتية على أطراف المقاومة مساوي لفولتية المصدر ($V_R = V_S$) مما يؤدي لثبات قيمة التيار المار في الدائرة، ويُمكن ملاحظة ما سبق بتطبيق قانون كيرتشوف للفولتية (KVL) على الدائرة المُبينة في الشكل (**3-3**) لتنتج المعادلة التالية.

$$V_S - (V_R + V_L) = 0 \qquad (3.2)$$

$$V_R = V_S - V_L$$

حيث؛

$$V_L = L\,\frac{di}{dt}$$

و

$$V_R = R.I$$

ومنه تُصبح المعادلة كالآتي:

$$R.I \upuparrows = V_S - L\frac{di}{dt} \downdownarrows \qquad (3.3)$$

حيث؛

$R.I$: الفولتية على أطراف المقاومة المُراد حساب قيمتها (V_R) والتي ترتفع مع الزمن ⇈.

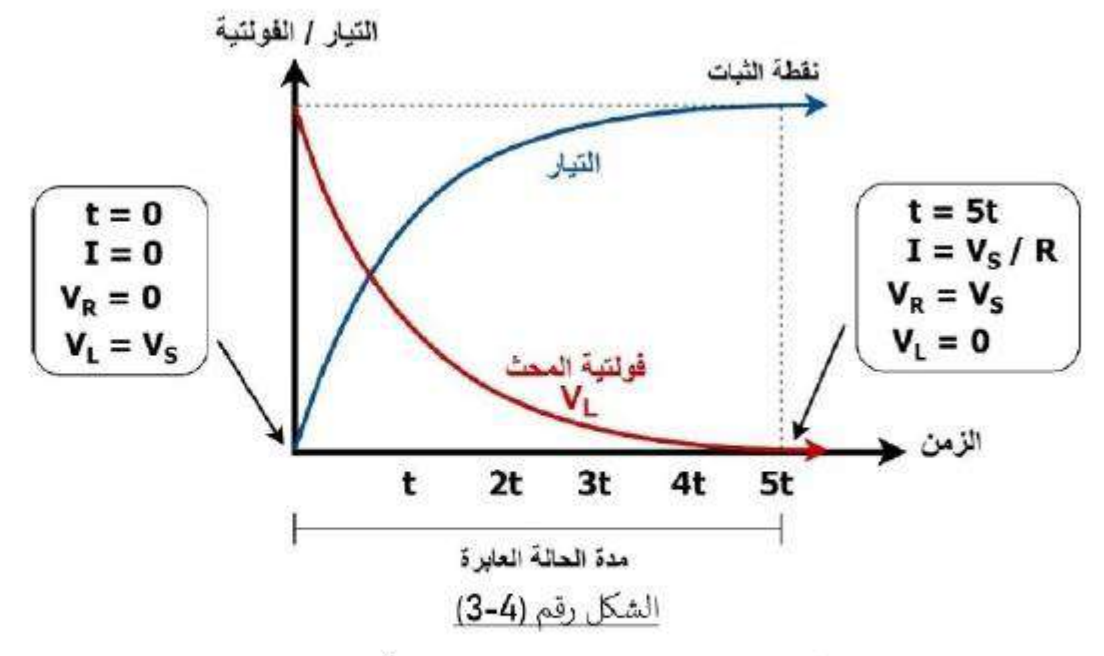
V_S : فولتية المصدر.

$L\frac{di}{dt}$: الفولتية على أطراف المحاثة (V_L) والتي تنخفض مع الزمن ⇊.

يُمكن ملاحظة إختلاف قيمة الفولتية المُحصِّلة المُطبقة على المقاومة وفقاً للتغيُّر في قيمة التيار المار في الدائرة نتيجة لوجود محاثة الملفات في الدائرة كما هو مُبين في المعادلة (**3.3**) السابقة، ومنها كذلك يُمكن صياغة معادلة تغيُّر التيار مع الزمن كالتالي:

$$I(t) = \frac{V}{R}\,(1 - e^{-Rt/L}) \qquad (3.4)$$

حيث (t) يُمثل الزمن وهو النسبة الناتجة عن قسمة قيمة المحاثة بالهنري (L) على قيمة المقاومة بالأوم (R)، وعادةً ما يتم الوصول إلى حالة إستقرار التيار لدوائر (**Series R-L**) عند ($5t$) وقد تصل لـ($9t$) حيث تكون دقة القياس قرابة (**±1%**) عند ($5t$) وقرابة (**±0.1%**) عند ($9t$). ومنه يُمكن ملاحظة تأثير قيمة المحاثة والمقاومة على زمن إستقرار التيار كما هو مُبين بالشكل (**3-4**).



الشكل رقم (3-4)

مما سبق يُمكن ملاحظة المُركّبة غير المرغوب بها التي يُضيفها التغيُّر في التيار على معادلة الفولتية التي يتم إحتساب قيمة المقاومة من خلالها كما هو مُبين في المعادلة (**3.5**) التالية.

$$V = R\,I + L\,\frac{di}{dt} \tag{3.5}$$

حيث؛

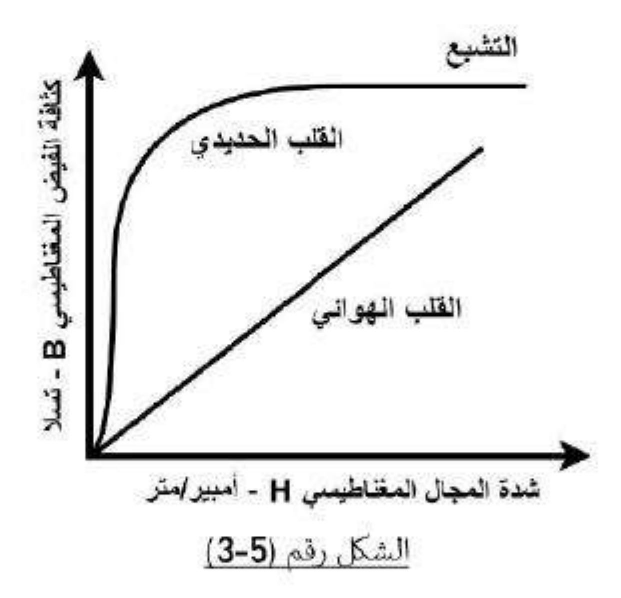
$\frac{di}{dt}$: تُعبّر عن مُعدل التغيُّر في تيار الملفات مع الزمن، والتي تصل لأدنى قيمة لها – قرابة الصفر – بعد فترة من الزمن.

وللتخلُّص من هذه المُركّبة يجب الإنتظار لحين إنتهاء هذه الحالة العابرة بالإضافة إلى المُحافظة قدر الإمكان على قيمة تيار فحص ثابتة طوال فترة الفحص، مما يجعل مُعدل تغيُّر التيار مع الزمن يؤول إلى الصفر ($^{di}/_{dt} = 0$) وذلك بدوره يقوم بإلغاء المُركّبة المُضافة إلى المعادلة (**3.5**)، ويؤدي إلى ثبات قيمة الهبوط بالفولتية على أطراف المقاومة ومنه ثبات قيمة المقاومة المُقاسة.

- **العامل الثاني: المُركّبة الناتجة عن التغيُّر في قيمة المحاثة الناتجة عن القلب الحديدي للمحول مع الزمن.**

إن سلوك ملفات المحول والتي يُمكن تمثيلها بدائرة (**Series R-L**) يختلف بحالة وجود قلب حديدي عن حالة عدم وجوده أي في حال إعتبار أن قلب المحول هوائي كما هو في الشرح السابق، وهذا بدوره يزيد الأمر تعقيد بحيث سيؤدي إلى تصاعد تيار الدائرة بشكل أبطأ نتيجة لظهور مُركّبة هبوط بالفولتية أخرى للمعادلة (**3.5**) السابقة سببها وجود محاثة ذات قيمة مُتغيّرة مع الزمن نتيجة لعدم تشبُّع القلب الحديدي أو كما تُسمى بالمحاثة المُشتركة (**Mutual inductance – L_m**) إلى جانب المحاثة الداخلية للملفات نفسها (**Winding Self Inductance - L**) ذات القيمة الثابتة والتي تم شرحها مسبقاً والمُبينة في الشكل (**2-3**). ففي حال إعتبار وجود قلب حديدي للمحول كما هو الحال في أغلب محولات القُدرة المُستخدمة عالمياً، تظهر محاثة ذات قيمة مُتغيّرة (L_m) نتيجة لإختلاف خصائص منحنى التشبُّع (**B-H Curve**) الخاص بالقلب الحديدي عن خصائص نظيره للقلب الهوائي والذي يتلخص في أن منحنى التشبُّع (**B-H Curve**) الخاص بالقلب الهوائي خطي (**Linear**)، أما منحنى التشبُّع الخاص بالقلب الحديدي فهو غير خطي (**Non-linear**) كما هو مُبين في الشكل (**5-3**).

حيث أن قيمة هذه المحاثة المُشتركة (L_m) الناتجة عن القلب الحديدي أو الهوائي تعتمد على ميل منحنى التشبُّع، ففي حالة القلب الهوائي ونظراً لخطية منحناه - ميل ثابت - فإن قيمة المحاثة المشتركة (L_m) تكون ثابتة وذات قيمة قليلة جداً وتكون معادلة الهبوط في الفولتية كما هو مُبين بالمعادلة (**3.5**)، أي أنها تتكون من مُركّبتين فقط ولا تحتوي سوى على محاثة الملفات نفسها (L). أما فيما يَخُص القلب الحديدي ذو منحنى التشبُّع غير الخطي - ميل مُتغيّر – فإن قيمة المحاثة المُشتركة



الشكل رقم (5-3)

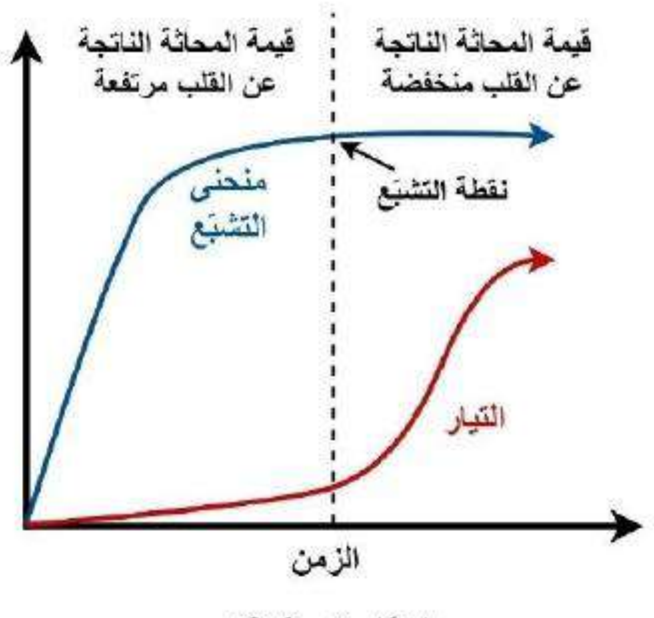
(L_m) تكون مُتغيّرة بتغيُّر الميل مما يُضيف مُركبة ثالثة لمعادلة الهبوط بالفولتية تعتمد قيمتها على معدل تغيُّر قيمة هذه المحاثة المُشتركة الناتجة عن القلب الحديدي مع الزمن كما هو مُبين بالمعادلة (3.6).

$$V = R\,I + L\,\frac{dI(t)}{dt} + I\,\frac{dL_m(t)}{dt} \quad (3.6)$$

حيث؛

$\frac{dL_m(t)}{dt}$: تُعبّر عن مُعدل التغيُّر في المحاثة الناتجة عن القلب الحديدي مع الزمن، والتي تصل لأدنى قيمة لها مع الثبات عند تشبُّع القلب الحديدي للمحول.

وكما يظهر في الشكل (**3-5**) فإن ميل المنحنى الخاص بالقلب الحديدي يتناقص مع الزمن إلى أن يصل للصفر عند تشبُّع القلب الحديدي، والذي بدوره يؤدي أيضا لتناقص مقدار المحاثة المشتركة الناتجة عن هذا القلب (L_m) ليُصبح الحال كما وأن القلب هوائي لا حديدي. وحالة التشبُّع هذه هي ما نرنو إليه حتى يتسنى لمعادلة الهبوط بالفولتية الثبات ومنه ثبات قيمة مقاومة الملفات.



الشكل رقم (**3-6**)

وبذلك يُمكن إعتبار قيمة المحاثة المشتركة المُتغيُّرة الناتجة عن القلب الحديدي (L_m) العامل الثاني من عوامل عدم إستقرار قيمة مقاومة ملفات المحول حيث تصل هذه المحاثة إلى أدنى قيمة لها بشكل ثابت عند تشبُّع القلب الحديدي، مما يتيح لتيار الفحص بالسريان دون عوائق والوصول إلى أعلى قيمة له والثبات كما هو مُبين في الشكل (**3-6**)، والذي يوضّح العلاقة بين قيمة تيار الفحص ومنحنى التشبُّع وقيمة المحاثة المُشتركة من جهة أُخرى. حيث يُمكن الملاحظة في ذات الشكل أن المحاثة الناتجة عن هذا القلب تسلك سلوك المفتاح الكهربائي، حيث أنها تعيق سريان التيار عندما تكون قيمتها مرتفعة أي قبل تشبُّع القلب الحديدي وتسمح للتيار بالسريان عند هبوط قيمتها بعد تشبُّع القلب الحديدي.

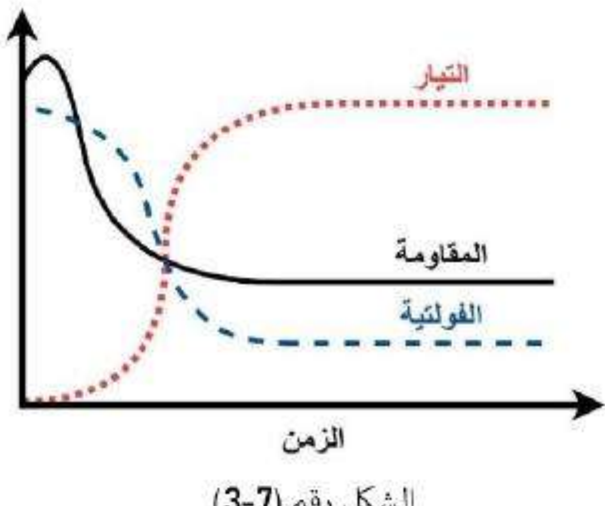
ومن الشرح السابق يُمكن إستخلاص أن المحاثة المُشتركة (Lm) ذات قيمة تعتمد على الزمن بالإضافة إلى قيمة التيار (كلما كان تيار الفحص أكبر كلما كان الوصول إلى نقطة التشبُّع أسرع)، بالإضافة إلى ما سبق لا بُد من الإشارة إلى فولتية الفحص كأحد العوامل التي تعتمد عليها قيمة المحاثة المُشتركة (Lm) إلى جانب العاملين المذكورين مسبقاً وهما الزمن وتيار الفحص، حيث أنه كلما إرتفعت الفولتية قلّ الزمن للحصول على الفيض المغناطيسي المؤدي لتشبّع القلب الحديدي للمحول كما هو مُبين في المعادلة (**3.7**) التالية:

$$Magnetic\ Flux = Voltage\ x\ Time \qquad (3.7)$$

وللتخلُّص من هذه المُركّبات غير المرغوب بها والتي تُعيق قياس قيمة المقاومة بسهولة ويُسر يُمكن القيام بالآتي:

- ✓ الإنتظار لحين إنتهاء هذه الحالة العابرة "الحالة العابرة الأولى الخاصة بسلوك دائرة الـ(**RL circuit**) والحالة العابرة الثانية الناتجة عن عدم تشبُّع القلب الحديدي للمحول"، فبعد إنتهاء هذه الحالة العابرة تستقر قيمة التيار مما يُتيح قياس قيمة المقاومة.
- ✓ المحافظة على ثبات قيمة تيار الفحص قدر الإمكان طوال فترة الفحص وذلك بإستخدام مصدر تيار ثابت مُتحكم به.
- ✓ رفع قيمة تيار الفحص للوصول إلى تشبُّع القلب الحديدي بشكل أسرع مع مراعاة عدم زيادته عن قيمة مُعيّنة حتى لا يؤدي لإرتفاع درجة حرارة الملفات مما يؤثر على قيمة المقاومة المُقاسة.
- ✓ بالإضافة إلى أساليب أخرى سيتم التطرق لها في نهاية الفصل مثل إضافة مقاومة خارجية ($R_{External}$) لدائرة الفحص وذلك لرفع مقدار المقاومة الكُلية وخفض مقدار المُعامل الزمني ($t = L/R$) مما يؤدي للوصول لحالة الإستقرار بشكل أسرع، أو زيادة عدد اللفات بمساعدة ملفات الفولتية المرتفعة (**HV assist**) أو ما يُسمى بطريقة الـ(**Dual winding**)، وغيرها من الطُرق كزيادة فولتية الفحص المُطبّقة على الملفات مما يزيد القوة الدافعة المغناطيسية و يؤدي للوصول إلى تشبُّع القلب الحديدي للمحول بشكل أسرع.

الشكل (**3-7**) يوضح سلوك التيار و الفولتية والمقاومة مع الزمن أثناء الفحص.



الشكل رقم (**3-7**)

فائدة عملية: عادةً عند فحص ملفات المحول الموصولة بطريقة النجمة (**Star - Y**) فإننا نقوم بتسجيل قيمة المقاومة بعد (**10s – 30s**) ثانية وهو الزمن اللازم لثبات قيمة تيار الفحص، أما في حالة فحص ملفات المحول الموصولة بطريقة المثلث (**Delta - Δ**) فإن الزمن اللازم لثبات قيمة تيار الفحص والوصول الى حالة التشبُّع المغناطيسي للقلب الحديدي قد يستغرق أكثر من ذلك حيث قد يصل إلى (**30min – 60min**) دقيقة وهذه القِيَم تختلف تبعاً لقدرة المحول (**Rating**) وتوصيلة الملفات (**Winding configuration**) وقيمة التيار المحقون (**Test current**) كما ورد في [**B. Hembroff, M Ohlen, P. Werelius, A Guide to Transformer Winding Resistance Measurements**].



- **كيف يدُل هذا الفحص على وجود قطع كُلّي أو جُزئي في الملفات:**

كما هو معلوم أن قيمة المقاومة تعتمد على طول الموصل ومساحة مقطعه العرضي بالإضافة إلى مقاوميّة المادة الموصلة وفقاً للقانون التالي:

$$R = \frac{\rho \, . \, l}{A} \qquad (3.8)$$

حيث:

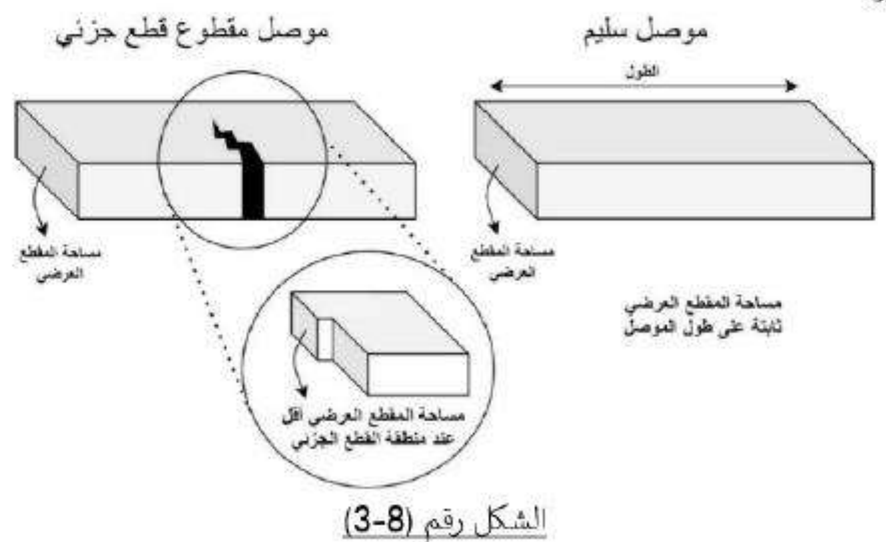
R : مقاومة الموصل (ملفات المحول).

ρ : المقاومية. (**Resistivity**)

l : طول الموصل.

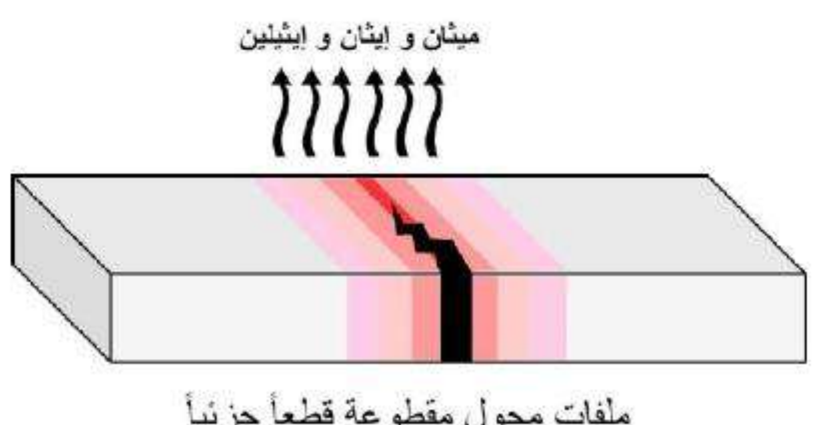
A : مساحة المقطع العرضي للموصل.

وفي حال حدوث قطع جُزئي (**Crack**) مثلاً للمادة الموصلة - ملفات المحول - فإن مساحة المقطع العرضي لهذا الموصل تتغيّر – تقلّ - مما يعني زيادة في قيمة المقاومة وفقاً للقانون (**3.8**) السابق وكما هو موضح بالشكل (**3-8**)، وبهذا الإرتفاع في قيمة المقاومة يمُكن معرفة وجود هذا النوع من الأعطال بملفات المحول.



الشكل رقم (**3-8**)

وهذا الإرتفاع بالمقاومة في منطقة القطع الجُزئي (**Crack**) سيؤدي إلى إرتفاع درجة حرارة هذا الموصل منتجاً بدوره غازات إحماء المعدن سابقة الذِكر كما هو موضح في الشكل (**3-9**)، لذلك تُعد هذه الغازات عند ظهورها مُجتمعة في تحليل الغازات الذائبة في زيت المحول (**DGA**) إلى جانب إرتفاع درجة حرارة المحول إحدى دلائل وجود هذا النوع من الأعطال في المحول.



ملفات محول مقطوعة قطعاً جزئياً

الشكل رقم (**3-9**)

أما في حالة وجود قطع كُلي للملفات (**Open circuit**) فإنه من المتوقع عدم مرور تيار فحص من الأساس.

الشكل (**3-10**) يُبين ملفات فولتية مرتفعة (**HV winding**) معطوبة الواردة في **[NICLAS GRÖNSTRÖM, Optimal Demagnetization of Transformer After Winding Resistance Measurements]**.



الشكل رقم (**3-10**)

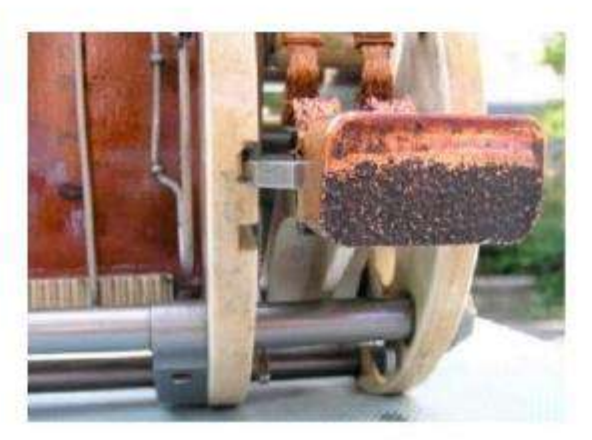
بالإضافة إلى ما سبق هنالك أجزاء أُخرى غير الملفات يُمكن لهذا الفحص الكشف عن الأعطال بها مثل نقاط إلتقاء موصلات عوازل الإختراق بالملفات، ونقاط إلتقاء الملفات بمُغيّر الخطوة كما هو موضح في الشكل (**1-3**)، فعند تعرُّض هذه النقاط للإرتخاء (**Loose**) فإن مساحة المقطع العرضي الكُلّية لمسار التيار تقلّ مُحدثةً مقاومة مرتفعة لهذه النقاط وما ينتج عنها من حرارة وفقاً للشرح السابق، بالإضافة إلى حدوث تفريغات في هذه الوصلة المرتخية مما يؤدي لإحماء إضافي.

أما فيما يَخُص مُغيّر الخطوة (**Tap-Changer**) فإن الغازات الذائبة في الزيت الخاص به والناتجة عن عمليات التبديل لهذا المُغيّر قد تتسبب في تآكسد أسطح ملامساته أو تراكم الكربون عليها خاصة للخطوات (**Taps**) الأقل إستخداماً، وهذا بدوره يؤثر على قيمة المقاومة المُقاسة للملفات. كذلك يُمكن لتآكل ملامسات مُغيّر الخطوة خاصة في المحولات القديمة أو ذات التحميل المُرتفع التأثير على قيمة فحص مقاومة الملفات.

الشكل [(**11-3**) (أ)] يبين ملامس معطوب لمُحدد خطوة (**Tap Selector**)، والشكل [(**11-3**) (ب)] يبين آثار التقادم على ملامس مفتاح تحويل (**Diverter Switch**) خاص بمُغيّر خطوة (**Tap-Changer**) من نوع (**OLTC**) الواردة في [**Raka Levi, Budo Milovic, OLTC Dynamic Testing**].



- أ -



- ب -

الشكل رقم (**11-3**)

4. أمور لا بُدَّ من مراعاتها قبل البدء بالفحص

4.1 إستقرار درجة حرارة المحول

كما هو معلوم أن قيمة المقاومة من القِيَم التي تتأثر بالحرارة بشكل كبير لذلك وللحصول على قيمة مقاومة ملفات حقيقية وللحد من تأثير درجة الحرارة على قيمة هذه المقاومة يجب التأكد من إستقرار درجة حرارة زيت وملفات المحول قبل القيام بالفحص، خاصة وأن هذا الفحص يهدِف لقياس مقاومة ملفات المحول وهو بارد أو كما يُسمى أيضا بفحص (**Cold Winding Resistance Measurements**).

ويبقى السؤال المطروح "كيف يُمكن التأكد من أن المحول وصل إلى مرحلة إستقرار الحرارة قبل البدء بالفحص؟"

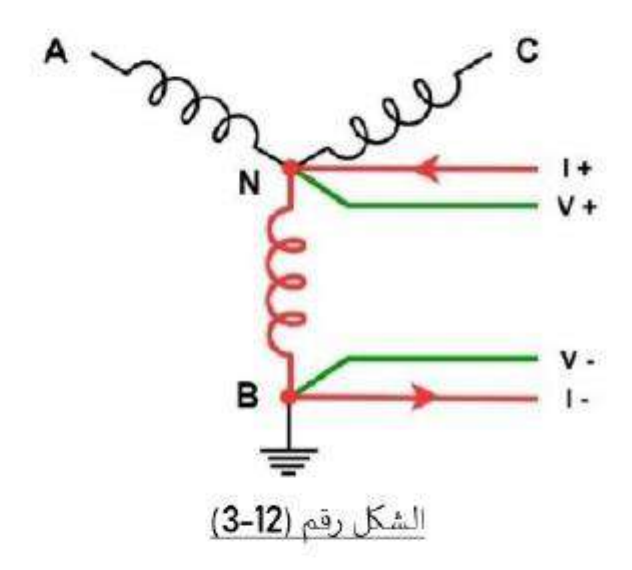
كثُرت الأراء والشواهد التي تؤكد أن المحول مُستقر حرارياً، فبالرجوع إلى أشهر المعايير العالمية (**Standards**) يُمكن القول أن المحول مُستقر حرارياً فيما إذا تحققت واحدة من الشروط التالية:

- ✓ عندما يكون مِقدار التغيُّر في درجة حرارة الزيت العُلوي (**Top Oil Temperature**) أقل من درجتين مئويتين لكل ساعة من الزمن حسب معايير (**Standards**) معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].
- ✓ مرور قُرابة الثلاث ساعات على عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**)، وذلك للمحولات التي لا تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران الطبيعي للزيت (**Oil Natural - ON**)، حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].
- ✓ مرور قُرابة الساعة على عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**)، وذلك للمحولات التي تحتوي على مضخة زيت أي ذات نظام التبريد الذي يعتمد على الدوران القَسري للزيت (**Oil Forced – OF**)، مع مراعاة إبقاء المضخة بالعمل بعد عزل المحول كهربائياً إلى وقت بداية الفحص حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].
- ✓ عندما يَكون مُتوسط درجة حرارة الزيت العُلوي (**Top Oil Temperature**) والسُفلي (**Bottom Oil Temperature**) مساوٍ بشكل تقريبي لدرجة حرارة الملفات (**Winding Temperature**) حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [**IEC 60076-1 2011**].
- ✓ عندما يَكون الفرق في درجة الحرارة بين زيت المحول العُلوي (**Top Oil Temperature**) والسُفلي (**Bottom Oil Temperature**) لا يزيد عن (**5°**) درجات مئوية حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.12.90-2015**].

4.2 توصيلة الملفات

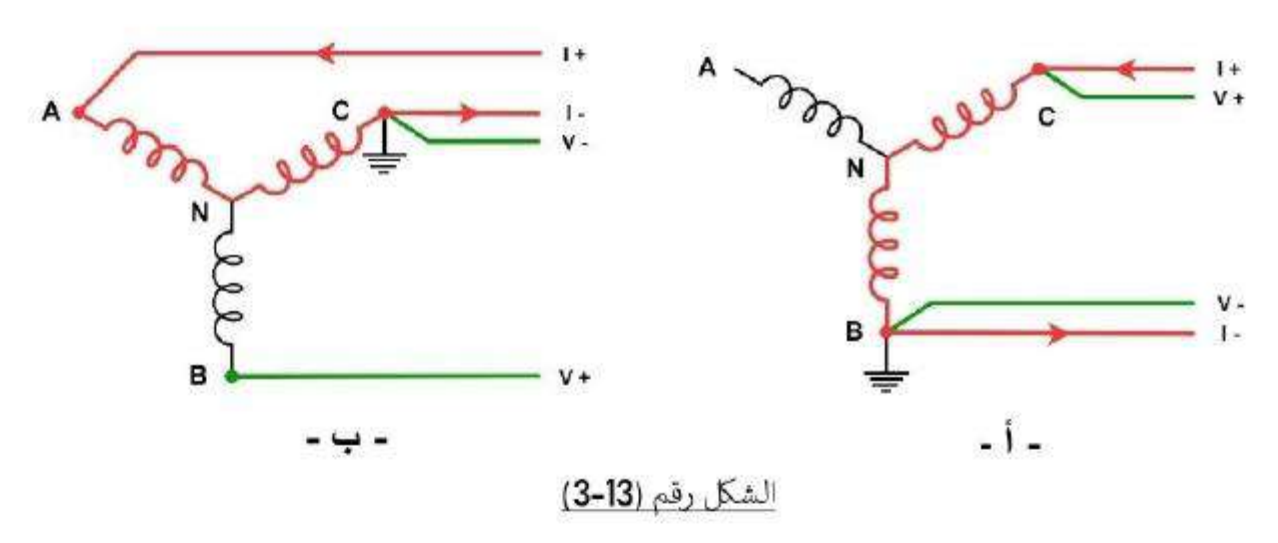
يجب مراعاة توصيلة ملفات المحول (**Winding connection**) المُراد فحصها قبل عمل توصيلة الفحص كالتالي:

- **إذا كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة بطريقة النجمة (Star - Y) مع إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Neutral)؛** يتم الفحص بين طرف الخط (**Line**) ونقطة التعادل (**Neutral**) وذلك بحقن تيار الفحص بملف واحد فقط كما هو موضح في الشكل (**3-12**).



الشكل رقم (3-12)

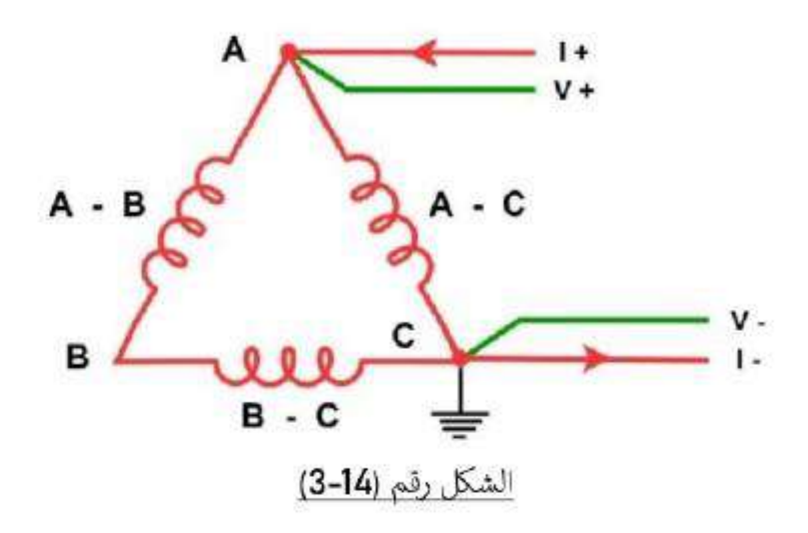
- **إذا كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة بطريقة النجمة (Star - Y) مع عدم إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (Neutral)**؛ أي أن ملفات المحول موصولة بطريقة النجمة داخلياً ونقطة التعادل غير ظاهرة يُمكن قياس قيمة المقاومة (C-N) مثلاً بإجراء الفحص بطريقتين موضحتين في الشكل (3-13).



الشكل رقم (3-13)

في الطريقة الموضحة بالشكل [(3-13) (أ)] يتم حقن التيار الثابت عبر الأطراف (C-B) أي خلال ملفين وقياس قيمة الهبوط بالفولتية على الأطراف (C-B) وحساب المقاومة ثم يتم قسمتها على (2) للحصول على قيمة المقاومة (C-N) فقط، أما في الطريقة الموضحة بالشكل [(3-13) (ب)] فإنه يتم حقن التيار الثابت عبر الأطراف (A-C) أي خلال ملفين وقياس قيمة الهبوط بالفولتية على الأطراف (C-B) والتي تساوي ضمنياً الهبوط في الفولتية على الأطراف (C-N) لأنه هو فقط الملف المشحون كما هو مُبين في الشكل السابق ومن ثم يتم حساب المقاومة (C-N).

- **إذا كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة بطريقة المثلث (Delta - Δ)**؛ يجب إجراء الفحص بين أطراف الخط (Line)، حيث أن المقاومة المُقاسة لا تُعبّر عن قيمة مقاومة الملفات المفحوصة فقط وذلك لتأثير مقاومة الملفين الآخرين على قيمة المقاومة المُقاسة كما هو مُبين بالشكل (3-14) التالي.



الشكل رقم (3-14)

كما هو مُبين في الشكل السابق فإنه يُراد قياس مقاومة الملف (**A-C**)، ولكن عند قياس المقاومة بإستخدام هذه التوصيلة فإن قيمة مقاومة الملفين (**A-B** و **B-C**) اللذان على التوازي مع الملف المُراد قياس مقاومته (**A-C**) يؤثران على قيمة هذه المقاومة لأن تيار الفحص سيمُر بهما، لذلك نلجأ إلى معرفة مقاومة الملفات حسابياً بإستخدام المعادلة التالية:

$$Resistancee\ per\ winding\ (A-C) = 1.5\ x\ Measured\ Resistance\ value \quad (3.9)$$



ملحوظة (3-2): يُمكن الإعتماد على الطريقة السابقة في حال كانت قيمة مقاومة الأطوار الثلاثة للملفات الموصولة على شكل مثلث (**Delta – Δ**) متساوية كما هو الحال في أغلب المحولات، أما إذا كانت قِيَم المقاومة مختلفة فإنه يُلجأ لطُرق أُخرى أكثر تعقيداً لمعرفة قيمة المقاومة لكل ملف على حدا.

- **إذا كانت المحول المُراد فحصه محول تلقائي (Autotransformer) أي أن الملفات موصولة بطريقة النجمة (Star - Y)؛** نقوم بالفحص بين أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (**HV**) وأطراف ملفات الفولتية المتوسطة (**IV**) ومن ثم بين أطراف ملفات المتوسطة (**IV**) وأطراف ملفات الفولتية المنخفضة (**LV**).



ملحوظة (3-3): في حال كانت الملفات المفحوصة تتكون من عدة ملفات فرعية أي في حالة وجود مُغيّر خطوة (**Tap Changer**)، فإنه يجب عمل الفحص على جميع الخطوات (**Taps**).

4.3 تسجيل درجة الحرارة

يجب تسجيل درجة حرارة الجو المحيط (**Ambient Temperature**) وكذلك درجة حرارة الملفات (**Winding Temperature**) قبل البدء بالفحص وذلك بأخذ قيمة حرارة الملفات عبر مؤشر درجة

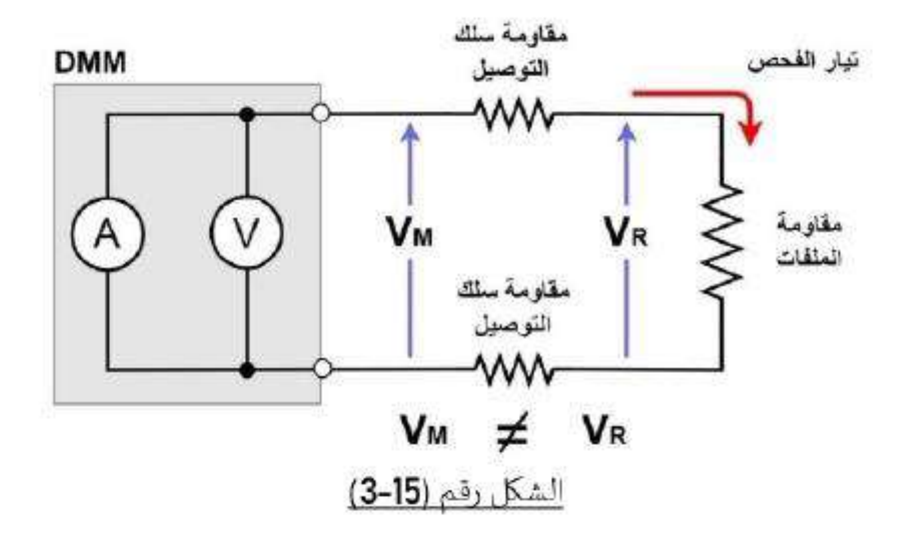
الحرارة الخاص بالملفات (**Winding Temperature Gauge**) والمُثبّت على جانب المحول في لوحة التحكم الخاصة بالمحول، وفي حال تعذُّر أخذها فإنه يتم إعتماد متوسط درجة حرارة الزيت الخاص بالمحول عبر مؤشرات درجة حرارة الزيت كُكُل أو العُلوي و السُفلي إن وجدت (**Top/Bottom Oil Temperature Gauges**)، كما وتَجدُر الإشارة إلى طريقة غير دقيقة لأخذ درجة الحرارة في حال وجود مشكلة في مؤشر درجة الحرارة وذلك عن طريق وضع مِقياس درجة حرارة (**Thermometer**) على جدران خزان المحول بشكل مُلاصق للحصول على درجة حرارة الملفات بشكل تقريبي في حال كان المحول مستقر حرارياً كما ذُكر في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.152-2013]**.

5. طُرق الفحص

هنالك عدة طُرق يُمكن من خلالها إجراء هذا الفحص بحيث يتم إعتماد الطريقة وفقاً للتجهيزات الموجودة بالموقع وتوافرية المُعدات اللازمة لهذا الفحص بالإضافة إلى مقدار المقاومة المُراد قياسها بداية من الطريقة المباشرة أو كما تُسمى (**Voltmeter-Ammeter (Kelvin) Method**)، حيث تُعد من أبسط الطُرق وأقدمها لإجراء هذا الفحص إلى جانب الطُرق التي تعتمد على القناطر (**Bridges**) مثل قنطرة كيلفين/ثومبسون (**Kelvin/Thompson Bridge**) التي يتم إستخدامها للمقاومات الأقل من (**1Ω**) أوم، أو قنطرة وتستون (**Wheatstone Bridge**) للمقاومات الأكبر من (**1Ω**) أوم. أما حالياً فإن أجهزة الفحص الإلكترونية الرقمية (**Digital Electronic Milli-Ohmmeters**) هي الأكثر شيوعاً لقياس قيمة المقاومات الصغيرة كمقاومة ملفات المحول والتي سيتم التطرُق إلى كيفية إستخدامها في المُلحقات.

5.1 الطريقة المباشرة – Voltmeter-Ammeter Method

هنالك عدة طُرق لقياس المقاومة بشكل مباشر، فمنها ما يَعتمد على طريقة زوج الأسلاك القياس (**Two Wires Method**) كما هو الحال في أجهزة القياس الرقمية (**Digital MultiMeter – DMM**) واسعة الإنتشار، ففي هذه الأجهزة يتم حقن تيار ثابت (**DC Current**) وقياس الهبوط في الفولتية على أطراف المقاومة المُراد فحصها عبر نفس الزوج من الأسلاك (**Test Leads**) كما هو مُبين في الشكل (**3-15**)، و نظراً لمرور تيار الفحص المُرتفع في هذا الزوج من أسلاك القياس فإن قيمة الهبوط في الفولتية المُقاسة (**Measured Drop Voltage - V_M**) لا تعكس مقدار الهبوط بالفولتية على المقاومة (**Voltage Across Resistance - V_R**) المُراد فحصها فقط وإنما تحوي كذلك الهبوط بالفولتية الناتج عن مرور التيار بزوج أسلاك الفحص (**Leads Drop Voltage - V_{Leads}**) كما هو موضح بالشكل (**3-15**)، حيث تُقدَّر قيمة مقاومة أسلاك الفحص عادة (**100mΩ – 1000mΩ**) ملي أوم وهي قيمة مُرتفعة ومن شأنها التأثير على قيمة المقاومة المُراد فحصها خاصة إذا كانت هذه المقاومة ذات قيمة قليلة، حيث لو أننا قمنا بقياس مقاومة مقدارها (**1Ω**) بإستخدام هذه الطريقة (**Two wires method**) وكانت قيمة مقاومة زوج أسلاك التوصيل (**Test leads**) قرابة الـ(**100mΩ**) فإن مقدار الخطأ في القياس (**Measuring Error**) سيساوي قرابة الـ(**10%**) بالمئة وهي قيمة مُرتفعة.



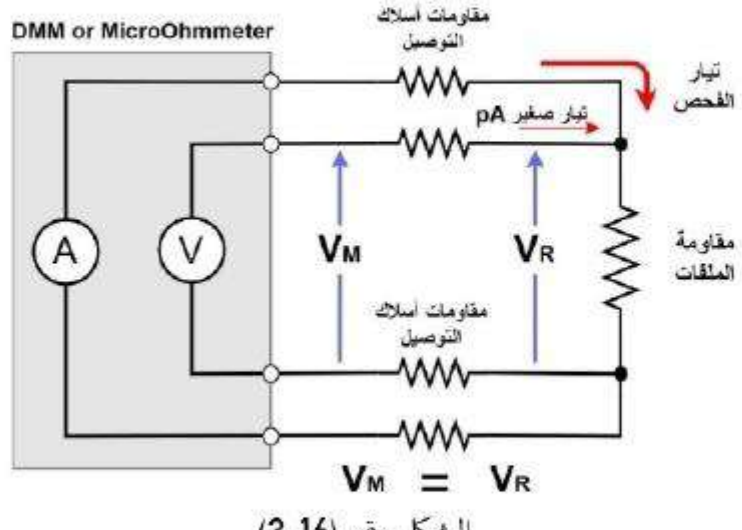
الشكل رقم (3-15)

حيث؛

$$R_{Measured} = \frac{V_{Measured}}{I} = R_{Winding} + R_{Leads} \tag{3.10}$$

يُمكن الملاحظة من المعادلة (**3.10**) السابقة أن قيمة المقاومة المُقاسة تساوي قيمة مقاومة الملفات مضافاً إليها قيمة مقاومة أسلاك التوصيل، مما يعني قيمة مقاومة ملفات غير دقيقة خاصة إذا كانت قيمة مقاومة هذا الملفات قليلة.

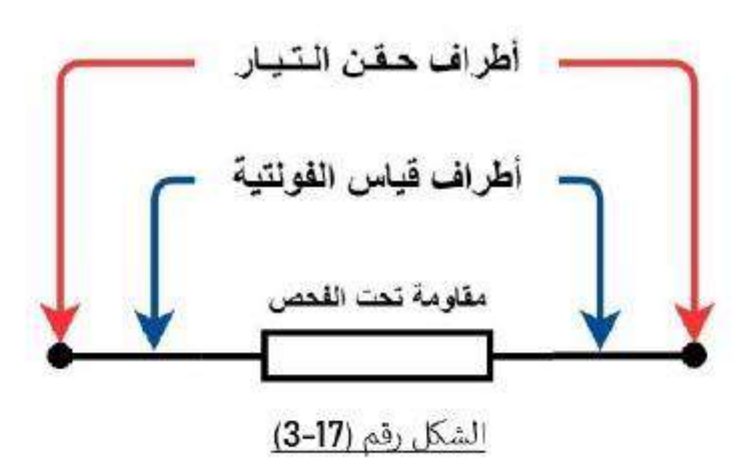
لذلك للمقاومات الصغيرة كما هو الحال في ملفات المحول يتم اللجوء لطريقة قياس أُخرى تستخدم زوجين من أسلاك التوصيل عوضاً عن زوج واحد (**Four Wires Method**) أو كما تُسمى (**Kelvin Method**) حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.152-2013**]، حيث يتم حقن المقاومة المُراد فحصها بتيار ثابت (**DC Current**) عبر زوج من أسلاك التوصيل (**Current Test leads**) وقياس الهبوط في الفولتية على أطراف المقاومة المُراد فحصها عبر زوج آخر من الأسلاك (**Voltage Test Leads**)، و نظراً للتيار القليل المار في زوج الأسلاك المخصص لقياس الفولتية والذي عادة ما يكون بالـ(**picoAmpere - pA**) بيكو أمبير فإن الهبوط بالفولتية الناتج عن مروره بمقاومة أسلاك التوصيل يُصبح ذو قيمة مهملة ولا يؤثر على قيمة المقاومة المُقاسة كما هو موضح في الشكل (**3-16**).



الشكل رقم (3-16)

ومنه يُمكن إعتماد هذه الطريقة (**Four Wires Method**) لقياس مقاومة ملفات المحول ذات القيمة القليلة وذلك لدقتها المرتفعة مقارنة مع نظيرتها ذات الزوج من الأسلاك (**Two Wires Method**) سابقة الذكر.

- **المُعدات المستخدمة بالفحص**
  - **مصدر كهربائي (Power Supply)**: مصدر تيار ثابت مُتحكم به (**Regulated Constant Current DC power supply**) ذو مستوى فولتية وتيار مناسب، ويُمكن أيضاً إستخدام بطارية (**12V**) فولت لإجراء هذا الفحص. كما يجب التأكد من أن هذا المصدر المُتحكم به مُعاير (**Calibrated**).
  - **أسلاك توصيل (Test Wires)**: يجب مراعاة الأمور التالية عند إختيار وتركيب أسلاك التوصيل الخاصة بهذا الفحص:
    - يجب إستخدام أقصر ما أمكن من أسلاك التوصيل وذلك لتجنُب تأثير المجالات من الخطوط القريبة (**OHL**) المشحونة، بالإضافة لتقليل تأثير مقاومة الأسلاك على المقاومة النهائية المُقاسة خاصة زوج الأسلاك المخصص لقياس الفولتية الثابتة (**Voltage Test Leads**). وفي حال كانت الأسلاك طويلة ولا يُمكن جعلها أقصر، يجب وضع الزائد منها بطريقة طولية جنباً إلى جنب وعدم لفها على شكل ملف (**Coil**) مما يُضيف محاثة غير مرغوب بها لدائرة الفحص.
    - مراعاة إختيار مساحة مقطع الأسلاك فيما يتناسب مع قيمة تيار الفحص.
    - تجنُب وصل أسلاك الفحص بالملفات المُراد قياس مقاومتها عبر موصلات إضافية أو قضبان (**Busbars**) بل يجب توصيلها بالملفات مباشرة عبر أطراف الموصلات الموجودة أعلى عازل الإختراق (**Bushing**).
    - يجب توصيل الأسلاك بالرأسية الخاصة بها أو ما يُسمى بالمشابك أو الملاقط (**Clamp or lugs**) فيما إذا كانت (**Spade-lug, Clip, Kelvin Clamp,... etc**) عن طريق اللحام لتجنب حدوث قطع أثناء الفحص لما لذلك من مخاطر كبيرة سيتم شرحها.
    - التأكد من نظافة موصل عوازل الإختراق (**Bushings**) قبل تركيب مشبك أو ملقط أسلاك التوصيل عليه (**Test Leads Clamp**) حتى لا تؤثر على نتيجة الفحص.
    - التأكد من التثبيت الجيد لرأسية/مشبك أسلاك التوصيل على موصلات عوازل الإختراق (**Bushings**) لتجنب سقوطها وفتح الدائرة أثناء الفحص وذلك يكون عبر وضع براغي على رأسية أسلاك التوصيل خاصة ذات النوع (**Spade or Fork lug**) أو عبر إستخدام مشبك إضافي على شكل حرف (**C**) أو كما يُسمى (**C Clamp**) للتثبيت الجيد لأسلاك التوصيل بأطراف الملفات كالموصلات الموجودة على أعلى عازل الإختراق (**Bushing**).
    - التأكد من أن تكون أطراف قياس الفولتية محصورة بين أطراف حقن التيار أي أنها أقرب للمقاومة المُراد فحصها وهي ملفات المحول في حالتنا هذه كما هو موضح في الشكل (**3-17**).



الشكل رقم (3-17)

كما ويُمكن أن يكون زوجي أسلاك التوصيل الخاصة بحقن التيار وقياس الفولتية على نفس المشبك أو الرأسية كما هو موضح بالشكل (**3-18**)، مع مراعاة النقطة السابقة بحيث تكون أسلاك قياس الفولتية أقرب للملفات، كما ويُسمح بأن تكون أسلاك قياس الفولتية متقابلة مع أسلاك حقن التيار أي تفصلهما زاوية مقدارها (**180°**) درجة كما هو الحال بالمشابك (**Clamps**) من النوع (**C**) والنوع (**Kelvin**).



الشكل رقم (3-18)

- **جهاز قياس تيار ثابت (DC) رقمي (Digital Ammeter)**: ذو دِقة عالية (**high Accuracy**) وكذلك ذو تدريج (**Scale**) مناسب لقِيَم الفحص، كما يجب التأكد من أنه مُعاير (**Calibrated**).
- **جهاز قياس فولتية ثابتة (DC) رقمي (Digital Voltmeter)**: ذو دِقة عالية (**high Accuracy**) وكذلك ذو تدريج (**Scale**) مناسب لقِيَم الفحص، كما يجب التأكد من أنه مُعاير (**Calibrated**).

- **مفاتيح تحكم (Switches):** مفتاح سكيني رباعي الأقطاب معزول (**4 Poles Knife Switch**) ومفتاح سكيني ثنائي الأقطاب معزول (**2 Poles Knife Switch**) مناسبين، بالإضافة إلى التأكد أنها لا تحتوي على مُصهر (فيوز).
- **ساعة إيقاف (Stopwatch):** لقياس الزمن اللازم للوصول لحالة الإستقرار بعد البدء بالفحص.
- **مقاومة غير حثية إضافية (Non-inductive External Resistor):** ذات قيمة كبيرة مقارنة بقيمة مقاومة ملفات المحول وذلك للمساعدة في الوصول لحالة إستقرار التيار في وقت أقصر تبعاً لما تم شرحه مُسبقاً حول المُعامل الزمني (t) و الذي يعتمد على قيمة المحاثة والمقاومة (L/R)، حيث بزيادة المقاومة يَقل هذا المُعامل الزمني مما يؤدي للوصول إلى حالة الإستقرار بزمن أقل، فمثلاً لو كانت قيمة مقاومة الملفات (**0.5Ω**) أوم وتم إضافة مقاومة خارجية لدائرة الفحص على التوالي مع مقاومة الملفات مقدارها (**1Ω**)، عندها سوف يَقلّ المُعامل الزمني بمقدار الثُلث و يَقل الزمن الكُلي للوصول إلى حالة الإستقرار قُرابة الخمس أثلاث (**5/3**) على إعتبار زمن الإستقرار عند ($5t$) لدوائر (**Series R-L**).

  كما ويتم إستخدام هذه المقاومة للتحكم والحد من قيمة تيار الفحص (**Current Limiting**) في حال كانت قيمة المقاومة المُقاسة قليلة جداً وكان مصدر الفولتية بطارية أو أي مصدر فولتية آخر غير مُتحكم به، حيث أنه عند تطبيق فولتية ثابتة (**DC Voltage**) مقدارها (**12V**) فولت غير متحكم بها (بإستخدام بطارية مثلاً) على ملفات محول مقاومتها (**20mΩ**) ملي أوم فإن التيار المُتوقع قُربة الـ(**600A**) وهو تيار كبير جداً وقد يُلحق الضرر بالملفات والمصدر الكهربائي، وللحد من قيمة هذا التيار يتم إضافة هذه المقاومة الخارجية لدائرة الفحص والتي تعتمد قيمتها على قيمة تيار الفحص المُرادة، ففي المثال السابق كانت فولتية الفحص (**12V**) فولت و مقاومة الملفات (**20mΩ**) وإذا أردنا تيار فحص مقداره (**1A**) أمبير فيجب إضافة مقاومة خارجية لدائرة الفحص قرابة الـ(**12Ω**) أوم مع مراعاة قُدرة هذه المقاومة على تبديد الحرارة (**Resistor Wattage**). ويجب مراعاة الحاجة إلى فولتية ثابتة (**DC voltage**) أكبر من (**12V**) فولت في بعض الأحيان وذلك لتعويض هبوط الفولتية الناتج من المقاومة المُضافة لدائرة الفحص. أما في حال إستخدام مصدر كهربائي ذو تيار ثابت مُتحكم به (**Constant DC Current Source**) فإنه لا يلزم إضافة مقاومة خارجية لدائرة الفحص.

- **طُرق تفريغ الطاقة المُختزنة بالملفات بعد إنتهاء الفحص.**

عند إجراء هذه الفحص ونتيجة لحقن محاثة ملفات المحول بتيار فحص ثابت (**DC current**)، تنشأ طاقة مُختزنة في هذه المحاثة تتناسب طردياً مع قيمة هذه المحاثة وقيمة مُربع تيار الفحص وفقاً للمعادلة التالية:

$$Stored\ Energy = \frac{1}{2}\ I^2\ L \qquad (3.11)$$

وكما هو معلوم أن الطاقة المختزنة في المحاثة (**Inductor**) يتم تفريغها عند فتح الدائرة الخاصة به (**Open circuit**) على النقيض من المكثفات (**Capacitors**) والتي تحتاج لدائرة قِصَر حتى يتم التفريغ (**Short circuit**). وللتخلص من هذه الطاقة المُختزنة بعد الإنتهاء من الفحص يجب القيام بواحدة من الطُرق التالية وذلك عن طريق دمجها بدائرة الفحص كالآتي:

- **طريقة القِصَر – Short Circuit Method**

في هذه الطريقة يتم قَصر أطراف الملفات (**Short circuit**) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل فتح دائرة الفحص الرئيسية كما هو مبين في الشكل (**3-19**) حيث أن الأجزاء باللون الأحمر تُشير لدائرة التفريغ، ويحتاج تيار التفريغ أو كما يُمكن تسميتها بالطاقة المختزنة للوصول إلى مستوى قليل جداً قرابة الـ($5t$) و هو تقريباً نفس الزمن اللازم لإستقرار التيار عند إجراء الفحص وذلك نظراً لثبات قيمة المُعامل الزمني (t) للحالتين كما هو مُبين في المعادلة التالية. وعادةً ما يَكون زمن التفريغ من (**30s**) ثانية إلى قرابة الدقيقتين (**2min**).

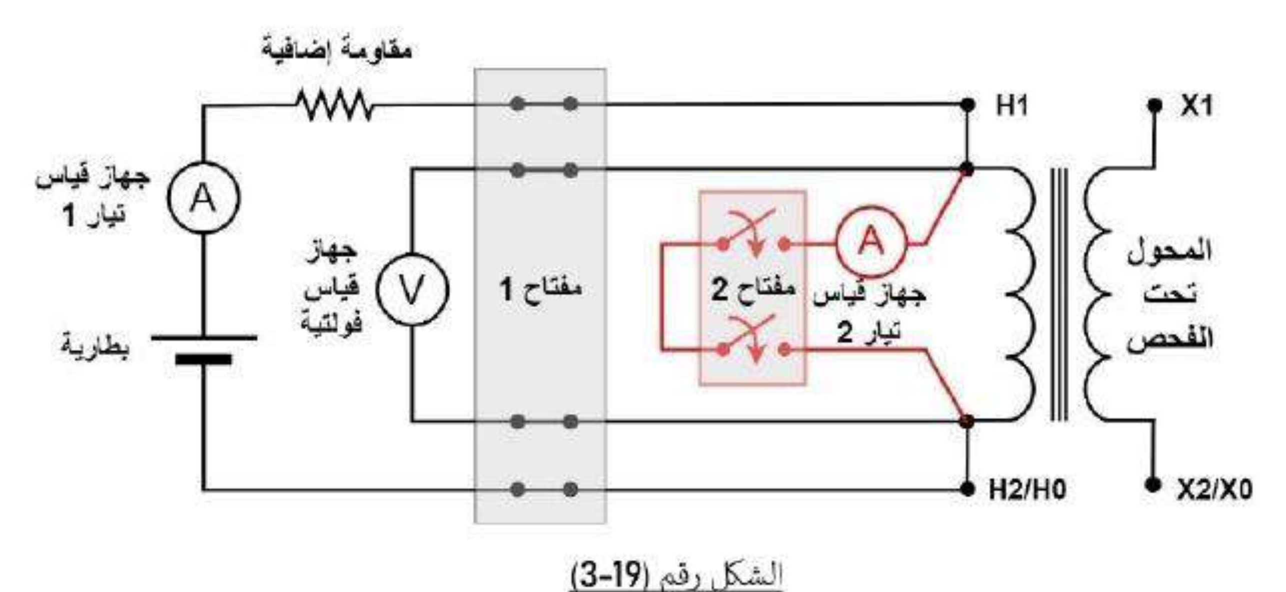
$$t = \frac{L}{R} = \frac{L}{R_w} \tag{3.12}$$

حيث؛

t : المُعامل الزمني لدائرة الـ(**Series R-L**).

L : قيمة المحاثة. (**Henry**)

R_w : قيمة مقاومة الملفات. (Ω)



الشكل رقم (**3-19**)

كما هو مُبين في الشكل (**3-19**) بعد إجراء فحص مقاومة الملفات (**WRM**) وتسجيل قيمة مقاومة الملفات نقوم بإغلاق المفتاح رقم (**2**) ومن ثم نقوم بفتح المفتاح رقم (**1**) والإنتظار حتى يصل التيار في وصلة القِصَر إلى الصفر عبر جهاز قياس التيار رقم (**2**)، بعد ذلك يُمكن فتح المفتاح رقم (**2**) مع مراعاة عدم النظر مباشرة لشرارة القوس الكهربائي التي ستظهر لمدة قليلة من الزمن قرابة الثانية الواحدة، ويُفضّل إغلاق وفتح المفتاح رقم (**2**) أكثر من مرة للتأكد من التفريغ الكامل

للملفات، بعد ذلك يُمكن إزالة أسلاك التوصيل الخاصة بالفحص بحذر ونقلها للطور الآخَر المُراد فحصه.

- **طريقة مقاومة التفريغ – Discharge Resistor Method**

في هذه الطريقة يتم قَصر أطراف الملفات (**Short circuit**) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل فتح دائرة الفحص الرئيسية على غرار الطريقة السابقة ولكن بوجود مقاومة تفريغ (R_D) للتقليل من زمن التفريغ كما هو موضح في الشكل (**20-3**) حيث أن الأجزاء باللون الأحمر تُشير لدائرة التفريغ، فكما ذُكر سابقاً أن قيمة المُعامل الزمني (t) تعتمد على قيمة المقاومة فبعد تعويض قيمة مقاومة التفريغ (R_D) في المعادلة (**3.12**) السابقة عِوضاً عن المقاومة (R) ونظراً لأن مقاومة التفريغ أكبر من مقاومة الملفات فإن المعامل الزمن سيقلّ ومعه تقلّ المدة اللازمة للتفريغ ووصول تيار التفريغ لقيمة قليلة جداً قرابة الصفر. ومما سبق يُمكن ملاحظة أنه كلما كانت هذه المقاومة أكبر كلما قلّ الزمن اللازم للتفريغ ولكن بالمقابل فإن القيمة الكبيرة لهذه المقاومة سوف تؤدي لظهور فولتية مرتفعة على أطرفها وفقاً للمعادلة التالية:

$$V_D = I_T \,.\, R_D \qquad (3.13)$$

حيث؛

V_D : أعلى مقدار فولتية سيظهر على أطراف مقاومة التفريغ.

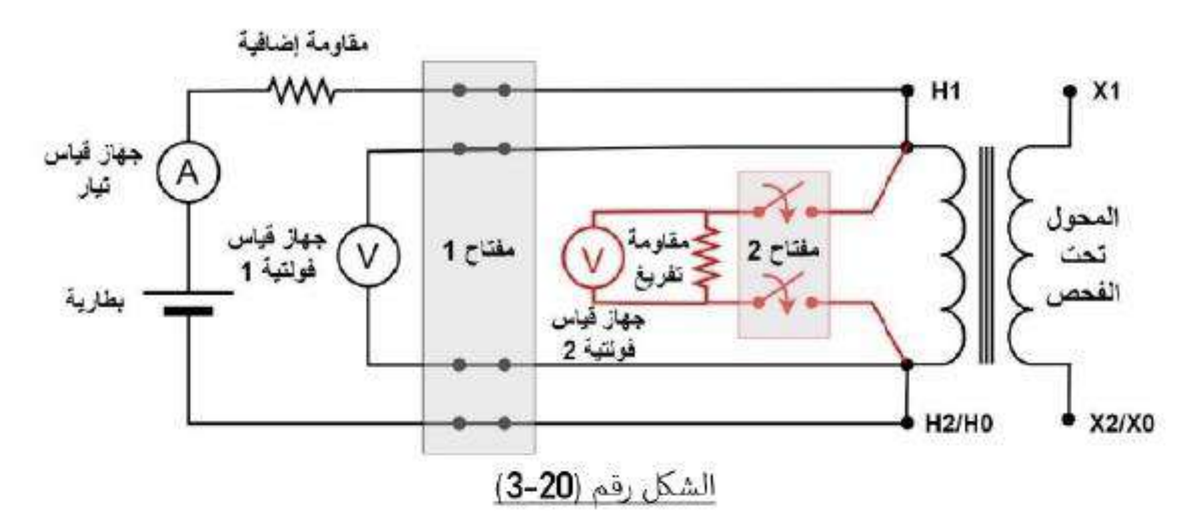
I_T : تيار الفحص.

R_D : مقاومة التفريغ.

لذلك ولتحديد قيمة هذه المقاومة (R_D) يُمكن تحديد قيمة الفولتية العُظمى التي ستظهر على أطرافها ومنه يُمكن معرفة قيمة هذه المقاومة وفقاً للمعادلة (**3.14**) على فرض أن الفولتية العظمى المُرادة على أطراف مقاومة التفريغ (R_D) ولا يجب تجاوزها هي (**50V**) فولت كمثال.

$$R_D = \frac{50}{I_T} \qquad (3.14)$$

وهذا بدوره يُفسر ظهور شرارة قوس كهربائي كبيرة عند فتح دائرة الفحص دون وجود دائرة تفريغ، حيث أنه عند فتح الدائرة كما وأنك أضفت مقاومة تفريغ (R_D) قيمتها لا نهائية (∞) ومن المعادلة (**3.14**) السابقة يُمكن ملاحظة تأثير مقاومة التفريغ اللانهائية على قيمة الفولتية على أطراف مقاومة التفريغ أو الأطراف المفتوحة في حالتنا هذه، حيث ستكون الفولتية بالكيلوفولت وهو سبب ظهور القوس الكهربائي سابق الذِكر.

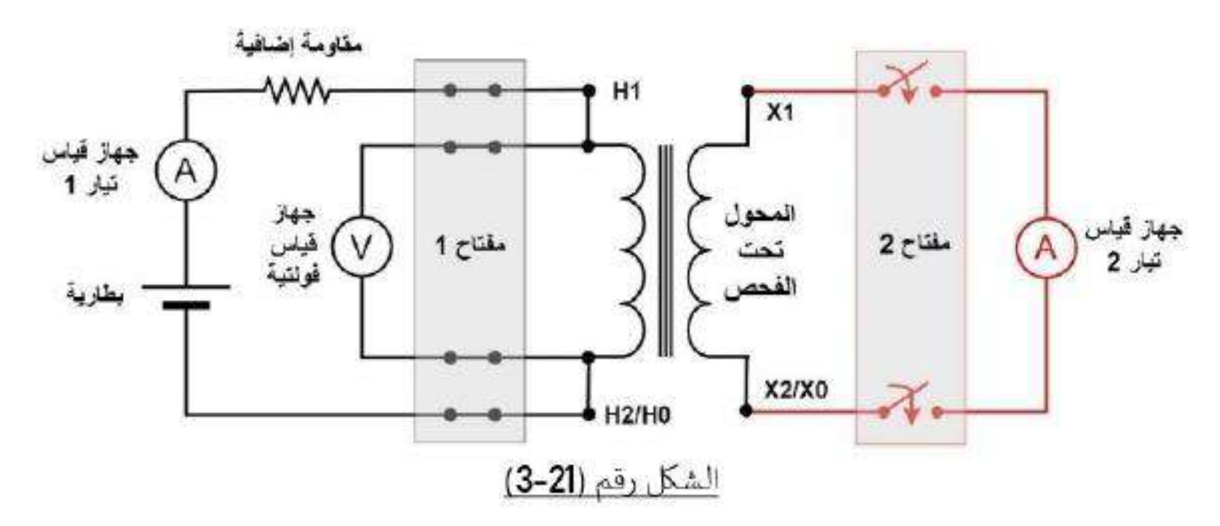


الشكل رقم **(3-20)**

كما هو مُبين في الشكل **(3-20)** بعد إجراء فحص مقاومة الملفات **(WRM)** وتسجيل قيمة مقاومة الملفات نقوم بإغلاق المفتاح رقم **(2)** ومن ثم نقوم بفتح المفتاح رقم **(1)** والإنتظار حتى تصل قيمة الفولتية على أطراف مقاومة التفريغ (R_D) إلى الصفر عبر مقياس الفولتية رقم **(2)**، بعد ذلك يُمكن فتح المفتاح رقم **(2)** مع مراعاة عدم النظر مباشرة لشرارة القوس الكهربائي التي ستظهر لمدة قليلة من الزمن قرابة الثانية الواحدة، ويُفضل إغلاق وفتح المفتاح رقم **(2)** أكثر من مرة للتأكد من التفريغ الكامل للملفات، بعد ذلك يُمكن إزالة أسلاك التوصيل الخاصة بالفحص ونقلها للطور الأخر المُراد فحصه.

- **طريقة التفريغ بواسطة الملفات الثانية على نفس الطور – Second Winding Method**

في هذه الطريقة يتم قصر **(Short circuit)** أطراف الملفات الأُخرى على نفس الطور (أي التي لم يتم فحصها) بشكل مؤقت، فمثلاً لو قمنا بإجراء فحص مقاومة الملفات **(WRM)** على أطراف الفولتية المرتفعة **(H1** و **H2)** يتم قَصر أطراف الفولتية المنخفضة **(X1** و **X2)** مع مراعاة أن تيار ملفات الفولتية المنخفضة سيكون أكبر تبعاً لنسبة التحويل الخاصة بالمحول و العكس بالعكس في حال فحص ملفات الفولتية المنخفضة والتفريغ على ملفات الفولتية المرتفعة.



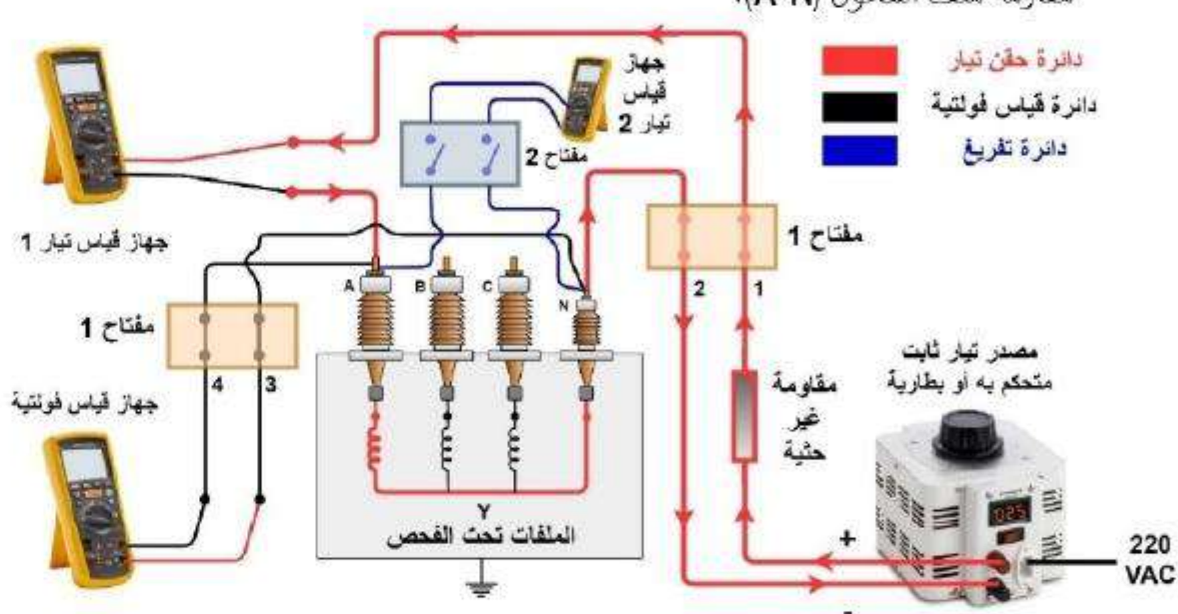
الشكل رقم **(3-21)**

الشكل (3-21) السابق يوضح التوصيلة الخاصة بفحص مقاومة الملفات مضافاً إليه طريقة التفريغ هذه والمشار إليها باللون الأحمر، بحيث تنتهي عملية التفريغ بعد وصول قيمة التيار للصفر عبر مقياس التيار رقم (2).

- **توصيلة الفحص**

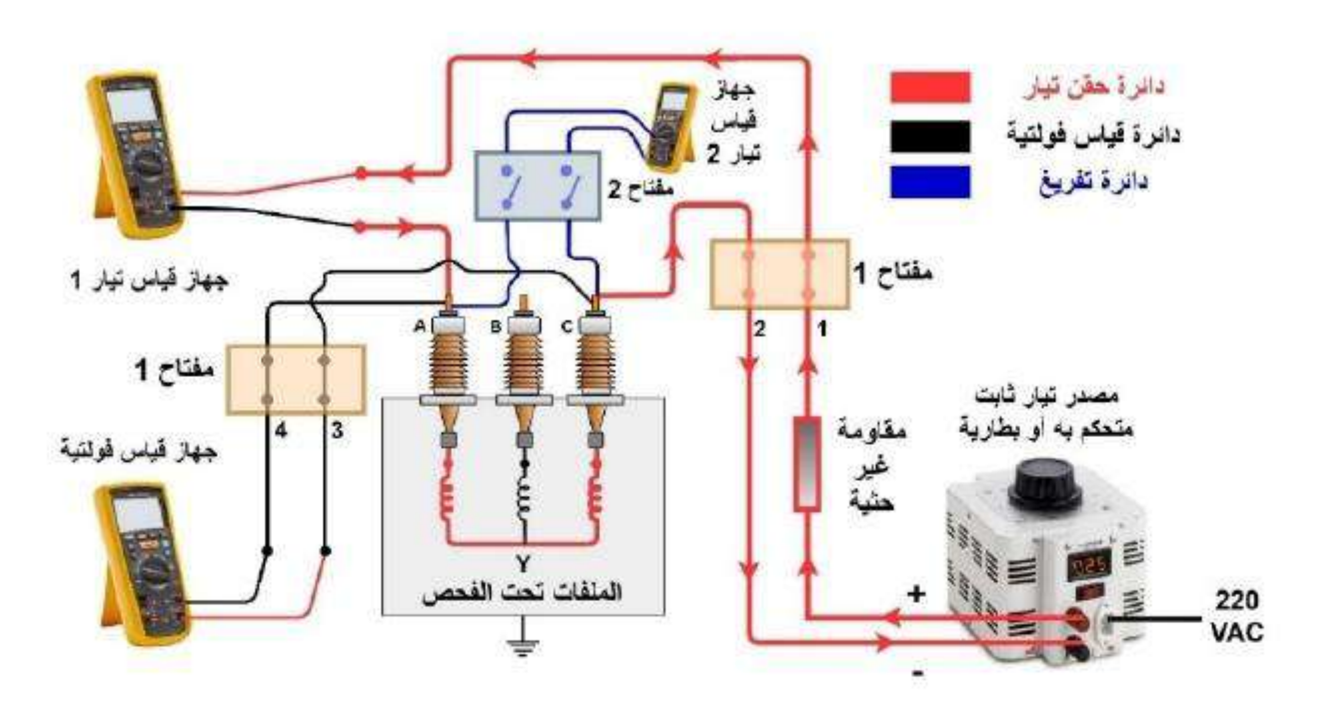
تعتمد توصيلة الفحص على التوصيل الداخلي لملفات المحول المُراد فحصه، وتتلخص توصيلات هذا الفحص للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (Three phase two winding) بثلاث توصيلات رئيسية موضحة أدناه، بحيث يتم عمل هذه التوصيلات مع مراعاة أن يكون مصدر الطاقة أخر شيئ يتم وصله بالدائرة لأسباب مُتعلقة بالسلامة العامة.

- **في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصه موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع نقطة تعادل (Neutral Point) يُمكن الوصول إليها.** يوضح الشكل (3-22) توصيلة الفحص لقياس مقاومة ملف المحول (A-N).



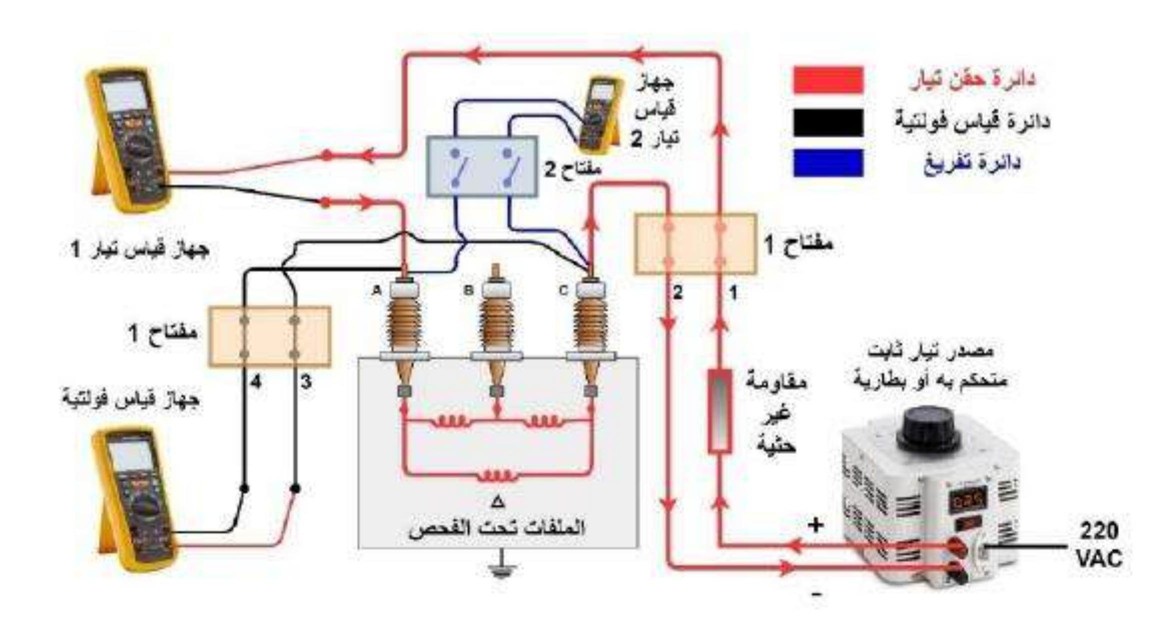
الشكل رقم (3-22)

- **في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصه موصولة على شكل نجمة (Star - Y) مع نقطة تعادل (Neutral Point) لا يُمكن الوصول إليها** (أي أنه موصول بطريقة النجمة (Star) داخلياً). يوضح الشكل (3-23) توصيلة الفحص لقياس مقاومة ملف المحول (A-N) أو (C-N)، وفي هذه التوصيلة يتم قسمة قيمة المقاومة المُقاسة (A-C) على العدد (2) للحصول على قيمة المقاومتين (A-N) و(C-N).



الشكل رقم (3-23)

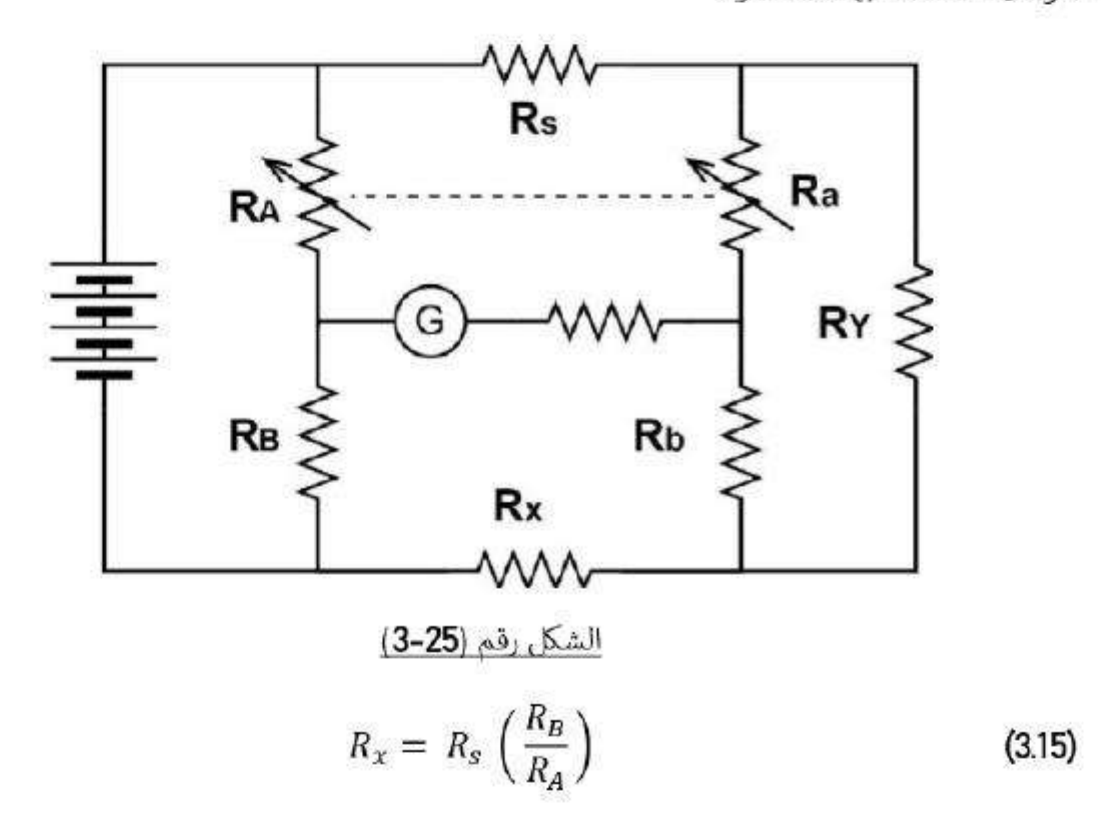
- في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصه موصولة على شكل مثلث (Δ - Delta). يوضح الشكل (3-24) توصيلة الفحص لقياس مقاومة ملف المحول (AC)، وفي هذه التوصيلة يتم ضرب قيمة المقاومة المُقاسة ((AC//(AB+BC)) بـ (1.5) للحصول على قيمة مقاومة الملف (A-C) كما تم ذكره سابقاً.



الشكل رقم (3-24)

5.2 قنطرة كيلفين/ثومبسون - Kelvin/Thompson Bridge

يتم إستخدام هذه القنطرة لقياس مقاومة ملفات المحول الأقل من **(1Ω)** أوم وتُعد أحد أشكال طريقة الزوجين من أسلاك التوصيل لقياس المقاومة أو كما تُسمى **(Four Wires Method)**، كما وتعتمد بعض أجهزة الفحص في آلية عملها على هذا النوع القناطر مثل جهاز الفحص **(Transformer Ohmmeter)** المُصنّع بواسطة شركة **(MEGGER)** الرائدة في مجال صُنع أجهزة القياس. الشكل **(25-3)** يوضح التوصيلة الخاصة بهذه القنطرة.



الشكل رقم **(25-3)**

$$R_x = R_s \left(\frac{R_B}{R_A}\right) \qquad (3.15)$$

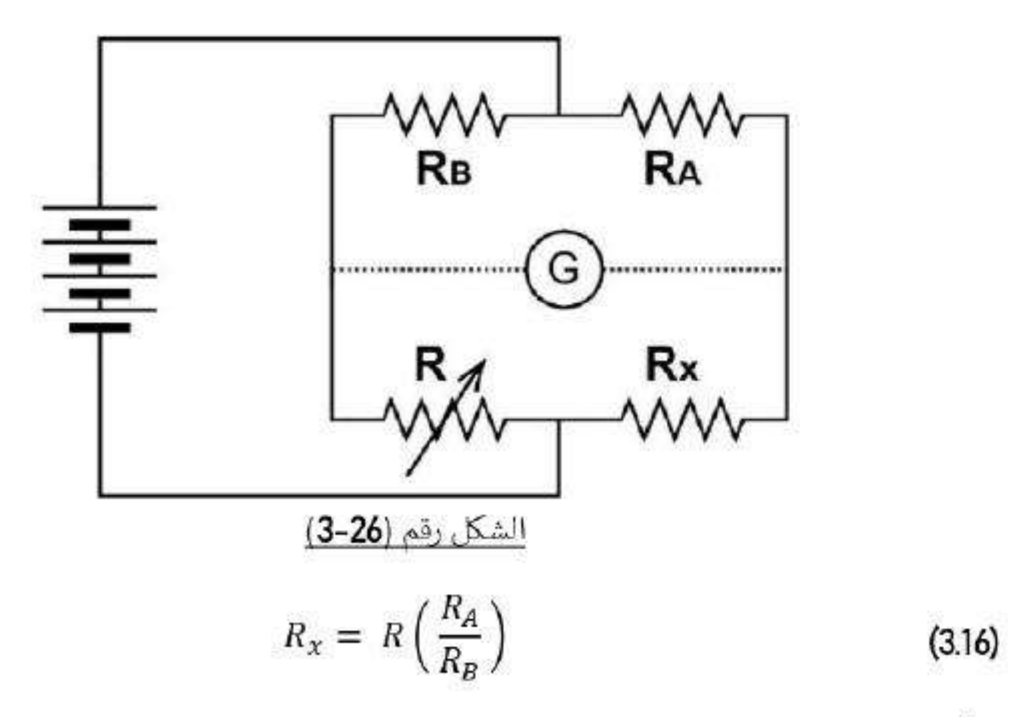
حيث؛

$$\{ R_B = R_b, R_A = R_a \}$$

وتُعبّر المقاومة (R_x) في الشكل السابق عن مقاومة ملفات المحول المُراد معرفة قيمتها.

5.3 قنطرة وتستون - Wheatstone Bridge

يتم إستخدام هذه القنطرة لقياس المقاومات ذات القيمة المساوية أو الأكبر من **(1Ω)** أوم وتُعد أحد أشكال طريقة زوج أسلاك التوصيل لقياس المقاومة أو كما تُسمى **(Two Wires Method)**، والشكل **(3-26)** يوضح التوصيلة الخاصة بهذه القنطرة.



الشكل رقم (3-26)

$$R_x = R\left(\frac{R_A}{R_B}\right) \quad (3.16)$$

وتُعبّر المقاومة (R_x) في الشكل السابق عن مقاومة ملفات المحول المُراد معرفة قيمتها.

5.4 الفحص بإستخدام جهاز ال(Milli-ohmmeter): حيث سيتم التوضيح لاحقاً خطوات الفحص في الملحق رقم (**2-3**) في حال إستخدام جهاز الفحص (**Transformer Ohmmeter AVTM830280**) المُصنَّع بواسطة شركة (**MEGGER**)، و الملحق (**3-3**) في حال إستخدام جهاز الفحص (**Transformer Ohmmeter MTO210**) المُصنَّع بواسطة شركة (**MEGGER**)، و الملحق (**3-4**) في حال إستخدام جهاز الفحص (**TESTRANO 600**) المُصنَّع بواسطة شركة (**OMICRON**).



تحذير: لا تحقن التيار في الملفات عبر مُصهرات (فيوزات) وإن وجدت يجب إلغاؤها بعمل وصلة قِصَر عليها (**Jumper**)، وذلك لأنها تزيد من إحتمالية حدوث فتح (**Open circuit**) في دائرة الفحص وهو من الأمور الخطرة خاصة إذا حدث ذلك أثناء مرور التيار الثابت (**DC**).



تحذير: عند القيام بهذه الطريقة يجب توخي الحذر من فتح الدائرة أثناء حقن التيار الثابت (**DC current**) قصداً أو دون قصد كسقوط أسلاك التوصيل الخاصة بحقن التيار عن أطراف المحول والذي من شأنه عمل صدمة حثية (**Induction Kick**) للمُعدات والأشخاص، وكذلك يجب تجنب الفصل المفاجئ للتيار مما يؤدي إلى إرتفاع الفولتية وإلحاق الضرر بالمصدر الكهربائي أو المقاومة الموصولة على التوالي، كما ويُنصح بقصر الملفات (**Short circuit**) قبل فصل المصدر الكهربائي كما هو موضح في الأشكال (**3-22,23&24**)، أو عبر إستخدام (**Surge or Transient Protector**) مناسب. كما ويُنصح بفصل أطراف قياس الفولتية قبل البدء بحقن التيار وقبل فصله لتجنُّب أي ضرر قد يُصيب جهاز الفحص (**Voltmeter**). (**مهم جداً**)

6. خطوات الفحص

الخطوات التالية تم وضعها بالإعتماد على المعايير الخاصة بمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE C57.152-2013]** بالإضافة إلى الخبرة العملية في إجراء هذا الفحص في الموقع:

6.1 عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (**Lock-out Tag-out LOTO**).

6.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خِشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

6.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing]** و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير **[ANSI National Electrical Safety Code]** و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية **[OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]**.

6.4 التأكد من توصيل خزان المحول (**Transformer Tank**) والقلب الحديدي (**Iron Core**) بالأرض طيلة مدة الفحص.

6.5 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**) وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) كذلك الحال بنقطة التعادل (**Neutral point**) للمحول إن وجدت.



تحذير: يجب تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (**Earthing Dis-connector**) أو المتنقلة (**Portable**) قبل البدأ بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines - OHL**) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.

6.6 فصل أية أجزاء ثانوية مُرتبطة بملفات المحول من محولات فولتية (**Voltage Transformers**) وحارفة (مانعة) الصواعق (**Surge Arresters**) و المُكثفات (**Capacitors**) أو أية عدادات (**Meters**) وغيرها من الأنظمة الثانوية كوجود المُتحسسات الخاصة بقياس التفريغ الجزئي (**PD Couplers**).

6.7 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول قبل الفحص (**Trapped Charges**) وذلك بعمل قِصَر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن كما سيتم شرحه في آخر الفصل.

6.8 مراعاة أن تكون باقي الملفات الخاصة بالمحول مفتوحة (**Open circuit**) أثناء الفحص.

6.9 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما تم شرحه مسبقاً في فقرة توصيلة الفحص بعد التأكد من تنظيف أطراف المحول التي سيتم التوصيل عليها حتى لا تؤثر على قيمة الفحص.

6.10 تحديد مستوى التيار المُراد حقنه أخذين بعين الإعتبار قيمة المقاومة المُراد قياسها والفولتية، فكلما رفعنا قيمة التيار إرتفعت قيمة الفولتية عند فحص نفس المقاومة في نفس درجة الحرارة (قانون أوم) لذلك يجب الموازنة بين التيار المحقون والفولتية.

فعند إختيار قيمة تيار الفحص يجب مراعاة الآتي:

- ✓ أن تكون قيمة تيار الفحص أكبر من قيمة تيار التهييج (**Excitation Current**) للمحول بمقدار (**2-4**) مرات وذلك لتحقيق التشبُّع المغناطيسي للقلب الحديدي.
- ✓ عادة ما يكون تيار الفحص من (**0.1% - 10%**) بالمئة من التيار الإسمي للمحول.
- ✓ أن لا يتجاوز تيار الفحص ما مِقداره (**15%**) بالمئة من التيار الإسمي لما لذلك من تأثيرات حرارية سلبية على نتيجة الفحص كرفع درجة حرارة الملفات وإختلاف قيمة المقاومة كما ورد في المِعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.12.90 2015]**.

وهنالك بعض الإقتراحات العامة لقيمة تيار الفحص كالآتي:

- ✓ إذا كانت قيمة المقاومة المُراد قياسها أكبر من (**100mΩ**) ملي أوم، (**10A**) أمبير أو أقل من ذلك تعتبر كافية.
- ✓ إذا كانت قيمة المقاومة المُراد قياسها أقل من (**100mΩ**) ملي أوم، (**20A – 50A**) أمبير يُمكن أن تكون كافية، مع مراعاة عدم إرتفاع التيار عن (**15%**) بالمئة من التيار الإسمي كما ذُكر مسبقاً.

فمثلاً لو أردنا قياس مقاومة ملفات محول و كُنا على عِلم مُسبق أن قيمة مقاومة هذه الملفات (**100mΩ**) ملي أوم (بواسطة الفحوصات المَصنعيّة أو المَوقعيّة أو الفحوصات السابقة) وكان التيار الإسمي لهذه الملفات (**500A**) أمبير؛ في هذه الحالة يُمكن إختيار تيار الفحص ليكون (**10A**) أمبير أي قُرابة الـ(**2%**) من التيار الإسمي لتكون فولتية الفحص (**1V**) فولت.

ولكن في حال كانت قيمة مقاومة الملفات غير معلومة، يُحبذ البدء بقيمة تيار منخفضة قرابة (**0.1%**) والإنتظار لحين إستقرار قيمة التيار والفولتية، وفي حال عدم الإستقرار يتم رفع قيمة التيار قليلاً وبشكل مُتدرّج إلى حين إستقرار النتيجة مع مراعاة عدم زيادة التيار عن القِيَم المسموح بها.

6.11 في حال تم إستخدام الطريقة المباشرة (**Voltmeter-Ammeter Method**) وعمل إحدى التوصيلات في الأشكال (**3-22,23&24**) السابقة يجب إتباع الخطوات التشغيلية التالية والخاصة بالتوصيلة الموضحة في الشكل (**3-22**) كمثال:

- ✓ إغلاق المفتاح رقم **1** و الإبقاء على المفتاح رقم **2** مفتوح.
- ✓ في حال إستخدام بطارية كمصدر فولتية فحص إنتقل للنقطة التالية، أم في حال إستخدام مصدر تيار ثابت (**Regulated DC Power Supply**) يجب تشغيل المصدر الكهربائي وبدء تطبيق الفولتية وفقاً لنوع المصدر للوصول لتيار الفحص المُراد.

- ✓ تشغيل ساعة الإيقاف (**Stopwatch**) في لحظة إغلاق المفتاح رقم **1** في حالة إستخدام بطارية كمصدر، أو عند بدء حقن التيار في حال إستخدام مصدر تيار ثابت متحكم به (**Regulated DC Power Supply**) لقياس الزمن اللازم لإستقرار التيار.
- ✓ الإنتظار لحين ثبات قيمة التيار والفولتية، ومن ثم قراءة وتسجيل قيمتهما عبر جهاز قياس التيار **1** و جهاز قياس الفولتية، بحيث يتم أخذ أربع قراءات للفولتية والتيار على الأقل ومن ثم حساب المتوسط لهذه القراءات للوصول إلى قيمة المقاومة الأقرب للواقع.
- ✓ بعد الإنتهاء من الفحص وحساب قيمة المقاومة، نقوم بإغلاق المفتاح رقم **2** بواسطة عصا معزولة (**Insulated Stick**) و فتح المفتاح رقم **1** لبدء عملية التفريغ.
- ✓ عند ملاحظة وصول قراءة جهاز قياس التيار **2** والخاص بدائرة التفريغ (القِصَر) إلى الصفر يُمكن فتح المفتاح رقم **2** بواسطة عصا معزولة مع مراعاة عدم النظر مباشرة لشرارة القوس الكهربائي التي ستظهر لزمن قليل جداً قرابة الثانية (**1s**).
- ✓ إغلاق المفتاح رقم **2** وفتحه بنفس الطريقة عدة مرات للتأكد من أن الدائرة مفرغة تماماً.
- ✓ إزالة أسلاك التوصيل عن أطراف الملف (الموصل أعلى عازل الإختراق) بحذر والإنتقال للملف التالي المُراد قياس مقاومته.

6.12 في حال كانت الملفات المفحوصة تتكون من عدة ملفات فرعية أي في حالة وجود مُغيّر خطوة (**Tap-Changer**) يجب مراعاة الآتي:

- ✓ يُفضّل فحص جميع الخطوات الخاصة بالطور (**A**) مثلاً، ثم الإنتقال للطور الآخر وفحص جميع خطواته (**Taps**) وهكذا، و ذلك لكسب الوقت اللازم للتشبُّع المغناطيسي للقلب الحديدي.
- ✓ إذا كان مُغيّر الخطوة من نوع (**DETC or OCTC**) وبعد الإنتهاء من الفحص على جميع الخطوات (**Taps**)، يجب إعادة الفحص بعد إرجاع وضعية مُغيّر الخطوة (**DETC**) إلى الخطوة المرجعيّة أو التشغيلية (**Reference Tap**) أي الذي كانت عليه الملفات قبل الفحص وذلك للتأكد من عدم وجود فتح في الدائرة (**Open circuit**) قبل كهربة المحول (**Transformer Energization**).

  فمثلاً لو كانت وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) للمحول في حالة التشغيل الطبيعي عند الخطوة رقم (**3**)، و أردنا فحص مقاومة الملفات عند جميع الخطوات يُفضل أن يكون ترتيب الفحص كالتالي (**3→5→4→3→2→1**) على إعتبار أن مُغيّر الخطوة ذو خمس خطوات (**5 Taps**)، أي يجب الإنتهاء بالخطوة رقم (**3**) للسبب المذكورة سابقاً.
- ✓ يجب فصل مصدر التيار قبل تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) لتجنب حدوث شرارة قوس كهربائي من شأنها إلحاق الضرر بملامساته أو مقاومته الداخلية.
- ✓ معرفة نوع مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) فيما إذا كان خطي (**Linear**) أو ذو تبديل عكسي (**Reverse**) أو غيره من الأنواع كالنوع (**Fine/Coarse**)، وذلك لتكوين تصوّر أولي عن نمط قراءات المقاومة الناتجة من الفحص كما سيتم شرحه لاحقاً في فقرة تحليل نتائج الفحص.

6.13 بعد الإنتهاء من الفحص تماماً (أي على جميع الملفات والأطوار) نقوم بتفريغ الملفات وذلك من خلال وصلها بحمل أو وصلها بالأرض وكذلك يجب التخلُّص من تمغنط القلب الحديدي (**Core Magnetization**) وذلك وفقاً للطرق التي تم شرحها سابقاً فيما يَخُص تفريغ الملفات و الخطوات التي سيتم شرحها فيما يَخُص طُرق إزالة تمغنط القلب الحديدي (**Core De-magnetization**). علماً بأن تفريغ الملفات (**Winding Discharge**) يتم عمله بعد فحص كل ملف والإنتقال للملف الآخر وبعد الإنتهاء من الفحص تماماً، أما إزالة مغنطة القلب (**Core De-magnetization**) فإنه يتم عملها مرة واحدة بعد الإنتهاء من الفحص تماماً أي على جميع الملفات والأطوار.



تحذير: لا تقُم بإطفاء (**Turn-off**) مصدر الطاقة (**DC Power Supply**) أثناء تزويده للتيار في ملفات المحول لأنه لن يتحمل التفريغ الصادر عن هذه الملفات.



تحذير: لا تَكُن على التوالي في دائرة الفحص تحت أي ظرف من الظروف لأسباب متعلقة بالسلامة العامة، و المقصود هنا أنه لا يجب أن تلمس فرضاً أطراف عازل الإختراق بيد واحدة وباليد الأخرى أحد أطراف التوصيل الخاصة بالفحص (حتى وإن كانت دائرة الفحص مُطفئة).



فائدة عملية: لتقليل نسبة الخطأ في الفحص يجب مراعاة قُطبية المغنطة للقلب الحديدي (**Polarity of Magnetization**) أثناء القيام في الفحص أي تثبيت إتجاه حقن التيار للملفات المُراد فحصها وذلك للوصول لحالة تشبُّع القلب الحديدي (**Core Saturation**) بشكل أسرع كما ورد في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.152-2013]**.

7. تصحيح القيمة المُقاسة

يُعد هذا الفحص من الفحوصات التي تتأثر قيمتها بتغيُّر درجة حرارة المادة الموصلة تحت الفحص والتي تتمثل بحرارة الملفات للمحولات المغمورة بالزيت بعد إستقرار درجة حرارة المحول كما تم ذكره مسبقاً، لذلك ولغايات مقارنة قِيَم المقاومات الناتجة عن هذا الفحص بقِيَم فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) أو المَوقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) أو غيرها من القِيَم المرجعيّة كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (**Routine Test**) لهذا الفحص، يجب تصحيح قيم المقاومات الناتجة من الفحص الى درجة الحرارة المَرجعيّة القياسية وهي عادة واحدة من هذه القِيَم التالية (**20°** أو **75°** أو **85°**) درجة مئوية حسب المعهد الوطني الأمريكي للمعايير (**ANSI**) وغيرها من المعايير العالمية وعادة ما يتم إعتماد درجة الحرارة المرجعيّة (**75°**) درجة مئوية للفحوصات المَصنعيّة (**FAT**)، بحيث يتم التصحيح عبر تطبيق المعادلة (**3.17**) التالية والواردة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.152-2013]**:

$$R_r = R_m \cdot \frac{(T_r + T_k)}{(T_m + T_k)} \quad (3.17)$$

حيث:

R_r : قيمة المقاومة نسبة للحرارة المرجعيّة (القيمة المُراد حسابها).

R_m : قيمة المقاومة المُقاسة.

T_r : الحرارة المرجعية (**20°** أو **75°** أو **85°**) درجة مئوية.

T_m : الحرارة التي تم قياس المقاومة عندها.

T_k : تساوي (**234.5°**) درجة مئوية للنحاس و (**225°**) درجة مئوية للألومنيوم، وقد تصل لـ(**230°**) درجة مئوية للألمنيوم المخلوط ببعض المعادن (**Alloyed Aluminum**).

مثال: تم قياس مقاومة ملفات نحاسية لمحول وكانت النتيجة (**50mΩ**) ملي أوم عند درجة حرارة ملفات (**30°**) درجة مئوية، ولغايات مقارنة قيمة المُقاومة المُقاسة مع قيمة مقاومة الملفات الواردة في فحص القبول المَصنعي لهذا المحول (**FAT**) قُم بتصحيحها لدرجة الحرارة المرجعية علماً بأن درجة الحرارة المرجعيّة لفحص القبول المَصنعي (**FAT**) مساوية لـ(**75°**) درجة مئوية؟

الحل:

قيمة المقاومة المُقاسة عند (**30°**) درجة مئوية تساوي (**50mΩ**) ملي أوم.

درجة الحرارة المرجعية (**75°**) درجة مئوية.

نوع الملفات نحاسية.

بالرجوع للمعادلة (**3.17**)

$$R_{75^\circ} = R_{30^\circ} \cdot \frac{(T_{75^\circ} + T_{234.5^\circ})}{(T_{30^\circ} + T_{234.5^\circ})}$$

$$R_{75^\circ} = 50m\Omega \cdot \frac{(75^\circ + 234.5^\circ)}{(30^\circ + 234.5^\circ)}$$

$$R_{75^\circ} = 58.51m\Omega$$

بعد ذلك يُمكن مقارنة قيمة المقاومة المُقاسة بعد تصحيحها لدرجة الحرارة المرجعية (**75°**) درجة مئوية مع قيمة المقاومة الواردة في فحص القبول المَصنعي (**FAT**) عند درجة الحرارة المرجعية ذاتها (**75°**).

كما وتَجدُر الإشارة إلى أنه في حال مقارنة نتيجة مقاومة الملفات بين الأطوار المختلفة (**Phases comparison**) **لا يلزم** تصحيح الحرارة قبل المُقارنة وذلك لأن الحرارة عند قياس مقاومة الملفات للأطوار الثلاثة تكون تقريباً متساوية.

8. تحليل نتائج الفحص

تتراوح قيمة مقاومة ملفات المحول من بضع عشرات من الملي أوم إلى عدة أومات (**Ohms**)، ولتحليل قيمة مقاومة الملفات المُقاسة بعد تصحيحها كما ذُكر سابقاً يُمكن إتباع واحدة من الطرق التالية:

8.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) أو المَوقعيّة (**Site Acceptance Test – SAT**) أو غيرها من القِيَم المرجعيّة كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (**Routine Test**) لهذا المحول بنسبة تباين قرابة الـ(**5%**) بالمئة أو أقل كما ورد في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.152-2013]**، و بنسبة تباين (**1%**) بالمئة كما ورد في الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **[CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445]**.

8.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمحول مُشابه تماماً (**Twin or Sister**) بنسبة تباين قرابة الـ(**2%**) بالمئة أو أقل.

8.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار المختلفة بنسبة تباين قريبة من الـ(**2%**) بالمئة ولا تتجاوز الـ(**5%**) بالمئة من القيمة كما ورد في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.152-2013]**، و بنسبة تباين (**3% - 2%**) بالمئة كما ورد في الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **[CIGRE Guide for Transformer Maintenance 445]**.

وفي حال قياس مقاومة ملفات محول وكانت الملفات موصولة على شكل نجمة (**Star - Y**) وكانت نقطة التعادل (**Neutral point**) غير ظاهرة (أي أنه موصول بطريقة النجمة داخلياً) أو في حال كانت الملفات المفحوصة موصلة على شكل مثلث (**Delta - Δ**)، يُمكن الإعتماد على الجدول (**3-1**) لمعرفة أنماط قراءات الفحص الأكثر شيوعاً في حال وجود عطل في الملفات، ولتحديد نوع العطل الداخلي للمحول فيما إذا كان قطع كُلّي (**Open circuit**) أو جزئي (**Crack**) أو هنالك قِصَر في الملفات (**Short circuit**) أو وجود نقاط توصيل رديئة يُمكن الإعتماد على الجدول (**3-2**).

<u>الجدول رقم (1-3)</u>

	توصيلة الملفات	نجمة - Y - Star			مثلث - Δ - Delta		
	قيمة المقاومة (L-L) حسابياً	$R_{AB} = R_{BC} = R_{AC} = 1\Omega$			$R_{AB} = R_{BC} = R_{AC} = 0.33\Omega$		
النمط الأول	نمط القيمة المُقاسة	R_{AB} = 1Ω	R_{BC} = ∞	R_{AC} = ∞	R_{AB} = 0.5Ω	R_{BC} = 0.5Ω	R_{AC} = 1Ω
		إحدى قِيَم مقاومة (L-L) طبيعية، و قيمتين لا يُمكن قياسهما (مقاومة كبيرة جداً)			قيمة مقاومة (L-L) أكبر من القيمة الطبيعية بثلاث مرات، و قيمتين أكبر من القيمة الطبيعية بمرة ونصف		
النمط الثاني	نمط القيمة المُقاسة	R_{AB} = ∞	R_{BC} = ∞	R_{AC} = ∞	R_{AB} = 0.5Ω	R_{BC} = ∞	R_{AC} = ∞
		جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة لا يُمكن قياسها (مقاومة كبيرة جداً)			قيمة مقاومة (L-L) أكبر من القيمة الطبيعية بمره ونصف، و قيمتين لا يُمكن قياسهما (مقاومة كبيرة جداً)		
النمط الثالث	نمط القيمة المُقاسة	R_{AB} = 1Ω	R_{BC} = 0.9Ω	R_{AC} = 0.9Ω	R_{AB} = 0.32Ω	R_{BC} = 0.32Ω	R_{AC} = 0.29Ω
		إحدى قِيَم مقاومة (L-L) طبيعية، و قيمتين أقل من القيمة الطبيعية			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أقل من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القيم أقل من الآخريات		
النمط الرابع	نمط القيمة المُقاسة	R_{AB} = 0.9Ω	R_{BC} = 0.8Ω	R_{AC} = 0.9Ω	R_{AB} = 0.31Ω	R_{BC} = 0.28Ω	R_{AC} = 0.28Ω
		جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أقل من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القيم أقل من الآخريات			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أقل من القيمة الطبيعية، وتكون قيمتين من هذه القيم أقل من القيمة الثالثة		
النمط الخامس	نمط القيمة المُقاسة	R_{AB} = 1Ω	R_{BC} = 1.1Ω	R_{AC} = 1.1Ω	R_{AB} = 0.34Ω	R_{BC} = 0.34Ω	R_{AC} = 0.38Ω
		إحدى قِيَم مقاومة (L-L) طبيعية، و قيمتين أكبر من القيمة الطبيعية			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أكبر من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القِيَم أكبر من الآخريات		
النمط السادس	نمط القيمة المُقاسة	R_{AB} = 1.1Ω	R_{BC} = 1.2Ω	R_{AC} = 1.1Ω	R_{AB} = 0.35Ω	R_{BC} = 0.39Ω	R_{AC} = 0.39Ω
		جمع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أكبر من القيمة الطبيعية، وتكون إحدى هذه القِيَم أكبر من الآخريات			جميع قِيَم المقاومة (L-L) الثلاثة أكبر من القيمة الطبيعية، وتكون قيمتين من هذه القِيَم أكبر من القيمة الثالثة		

*الأرقام الواردة في الجدول أعلاه (قِيَم المقاومات) عبارة عن أمثلة لغايات الشرح فقط.

الجدول رقم (3-2)

النمط*	نوع العطل المُتوقع
الأول	1. وجود فتح في الدائرة ناتج عن قطع في نقاط التوصيل بين ملفات المحول و موصلات عوازل الإختراق أو مُغيّر الخطوة على أحد الأطوار. 2. أحد ملفات المحول الثلاثة مقطوع قطع كُلي (طور واحد). 3. عطل داخلي في مُغيّر الخطوة على أحد الأطوار.
الثاني	1. وجود فتح في الدائرة ناتج عن قطع في نقاط التوصيل بين ملفات المحول و موصلات عوازل الإختراق أو مُغيّر الخطوة على طورين. 2. ملفين من ملفات المحول الثلاثة مقطوعين قطعاً كلياً (طورين من ثلاثة). 3. عطل داخلي في مُغيّر الخطوة على طورين.
الثالث	1. وجود قِصَر في أحد ملفات المحول الثلاثة (طور واحد).
الرابع	1. وجود قِصَر في ملفين من ملفات المحول الثلاثة (طورين من ثلاثة).
الخامس	1. وجود نقاط توصيل رديئة بين أسلاك الفحص والموصل على طور واحد. 2. وجود نقاط توصيل رديئة داخل المحول، كنقطة لإلتقاء موصل عازل الإختراق بموصلات الملفات أو نقطة توصيل الملفات بمُغيّر الخطوة على طور واحد. 3. وجود قطع جزئي بالملفات على طور واحد.
السادس	1. وجود نقاط توصيل رديئة بين أسلاك الفحص والموصل على طورين. 2. وجود نقاط توصيل رديئة داخل المحول، كنقطة لإلتقاء موصل عازل الإختراق بموصلات الملفات أو نقطة توصيل الملفات بمُغيّر الخطوة على طورين. 3. وجود قطع جزئي بالملفات على طورين.

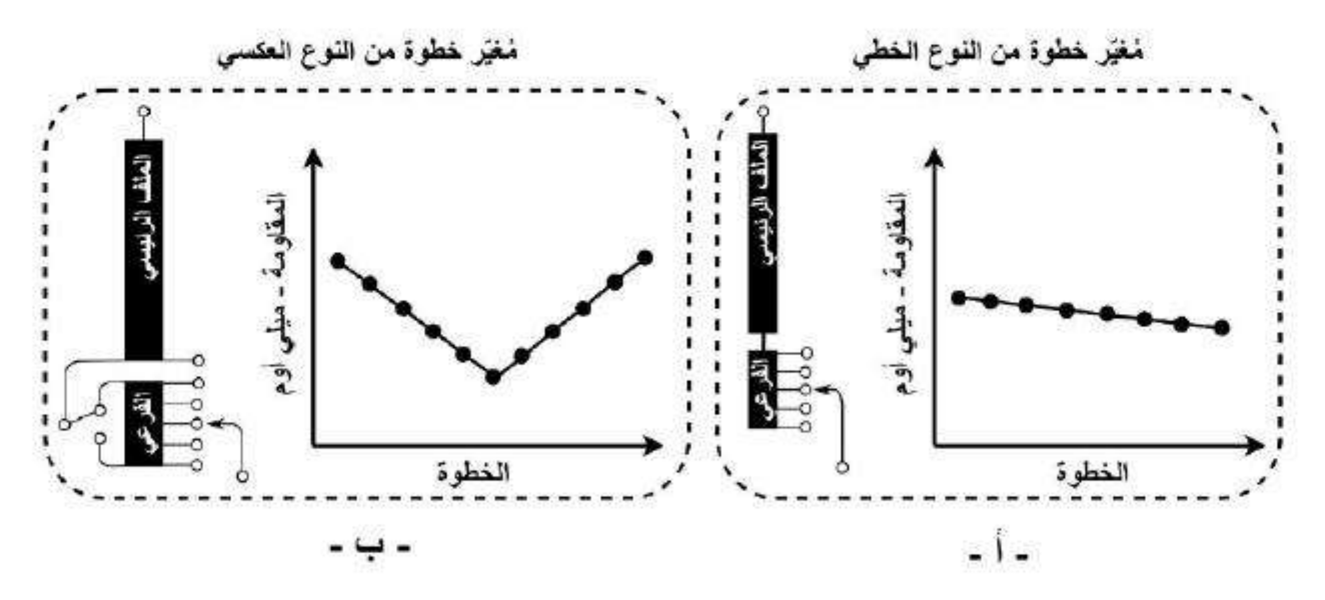
*يُمكن الرجوع للجدول (1-3) لمعرفة رقم النمط ونوعه.



ملحوظة (3-4): عادة ما تكون قيمة مقاومة ملفات الفولتية المرتفعة (**HV Winding**) أكبر من نظيرتها لملفات الفولتية المنخفضة (**LV Winding**) نظراً لكثرة عدد اللفات وصِغَر حجم المقطع لموصلات هذه الملفات، لذلك فإن التغيُّر الطفيف على قيمة هذه المقاومة الكبيرة الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة نتيجة لوجود مشكلة في الملفات قد لا يُمكن ملاحظته بسهولة على العكس من مقاومة ملفات الفولتية المنخفضة (**LV Winding**) ذات المقاومة الصغيرة قرابة بضع ملي أوم والتي يَسهُل إكتشاف التغيُّر الطفيف في قيمتها.

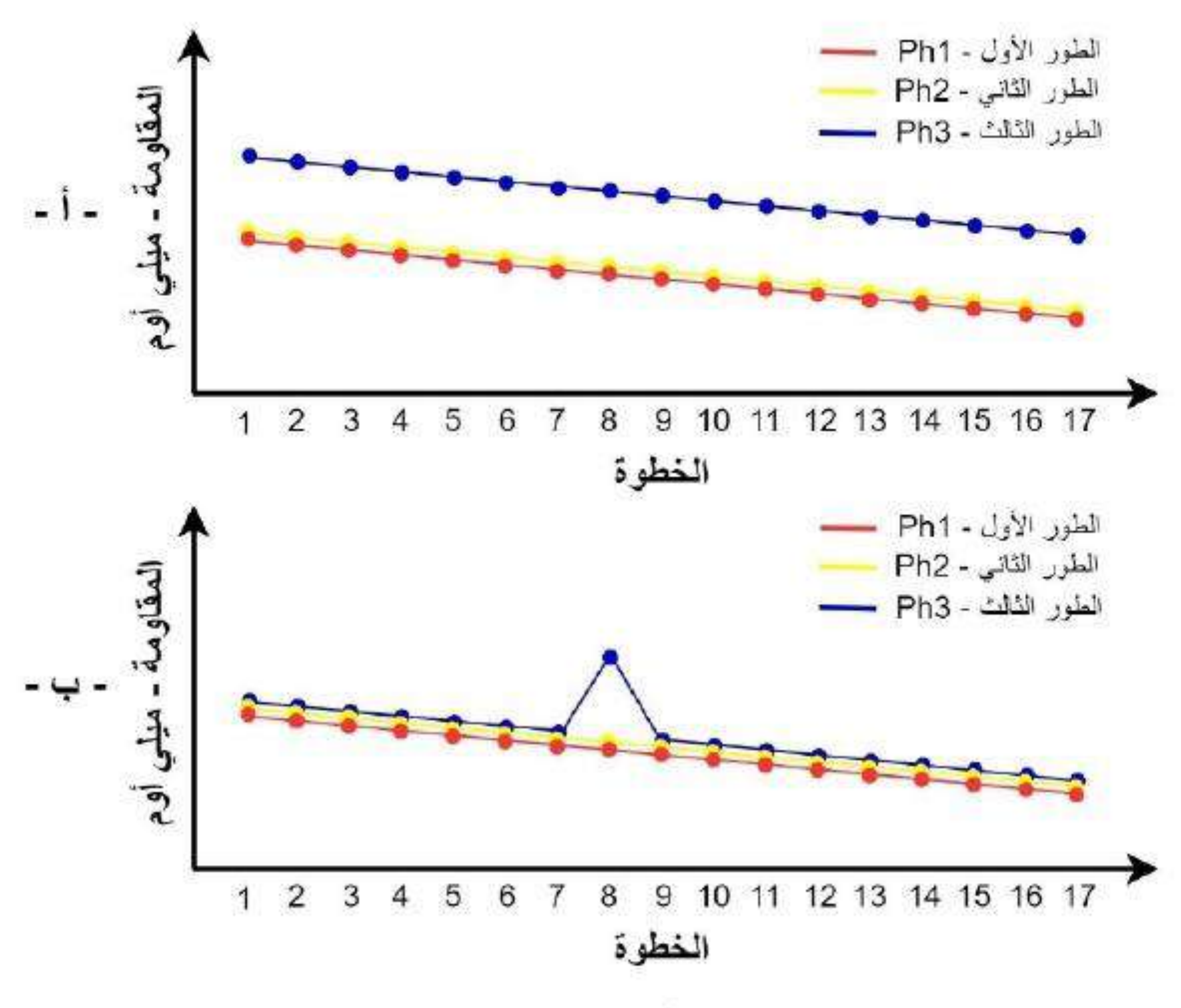
عند تحليل نتائج فحص المقاومة الإستاتيكي (**Static Winding Resistance Test**) لملفات محول تتكون من عدة خطوات (أي بوجود مُغيّر خطوة)، فإلى جانب مقارنة قيمة المقاومة كما ذُكر سابقاً يُنصح برسم العلاقة بين قِيَم مقاومة الملفات المُقاسة ورقم الخطوة (**Tap**)، وذلك لتسهيل عملية التحليل عبر ملاحظة خطية (**Linearity**) المنحنى الناتج عن رسم هذه العلاقة بالإضافة إلى التأكد من تطابق المنحنى الخاص بالأطوار الثلاثة.

ويوضح الشكل [(3-27) (أ)] العلاقة سابقة الذِكر لملفات محول بمُغيّر خطوة من النوع الخطي (Linear OLTC)، والشكل [(3-27) (ب)] لملفات محول بمُغيّر خطوة من النوع العكسي أو كما يُسمى بمُغيّر خطوة ذو تبديل عكسي (Reversing Changeover OLTC)، بحيث يُمكن ملاحظة خطية المنحنى بالإضافة إلى تطابق المنحنى للأطوار الثلاثة.



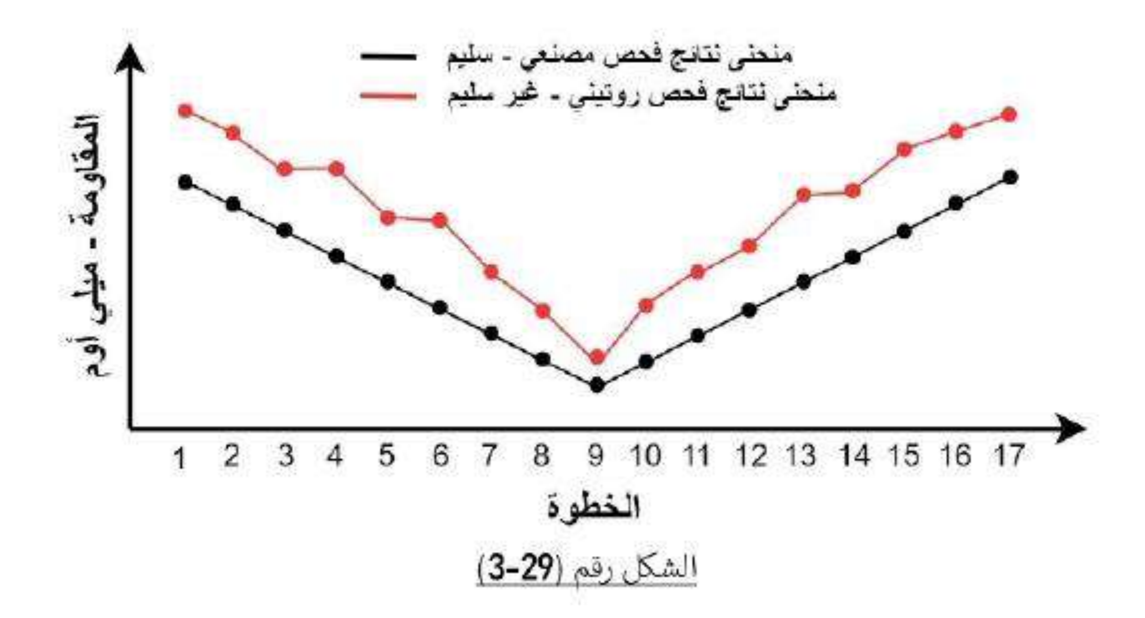
الشكل رقم (3-27)

في حال لم يَكُن منحنى قيم المقاومات خطياً كما هو مُبين بالشكل (3-27) السابق لكل من نوعي مُغيّر الخطوة فإن هذا ينم عن وجود عطل ما في مُغيّر الخطوة، ومن الأعطال الشائعة في مُغيّرات الخطوة تآكل أو تأكسد ملامساته الخاصة بمفتاح التحويل (Diverter Switch) أو مُحدد الخطوة (Tap Selector) بالإضافة إلى وجود إرتخاء في نقاط التوصيل وغيره من الأعطال. الشكل [(3-28) (أ)] يُبين منحنى مقاومة خاص بمحول ذو مُغيّر خطوة من النوع الخطي (Linear OLTC) بحيث يُمكن ملاحظة عدم تطابق المنحنى الخاص بأحد الأطور مع بقية أطوار المحول مما يكشف وجود مشكلة في هذا الطور بالتحديد، والشكل [(3-28) (ب)] يُبين منحنى مقاومة خاص بمحول ذو مُغيّر خطوة من النوع الخطي (Linear OLTC) بحيث يُمكن ملاحظة ظهور بعض قِيَم المقاومة المرتفعة عند إحدى الخطوات الخاصة بهذا المُغيّر (Tap Changer) مما يُشير لوجود مشكلة محتملة في ملامسات هذه الخطوة (Tap) فقط.



الشكل رقم (**3-28**)

يُبين الشكل (**3-29**) منحنى مقاومة ملفات أحد أطوار محول ذو مُغيّر خطوة من النوع ذو التبديل العكسي (**Reversing Changeover OLTC**) بحيث يُمكن ملاحظة عدم خطيته وعدم مطابقته لمنحنى المقاومة المرجعي (المَصنعي) الخاص بنفس المُغير لهذا الطور.



الشكل رقم (**3-29**)

الأشكال (**3-28 & 29**) السابقة تؤكد وجود عطل في مُغيّر الخطوة نفسه أو في نقاط إلتقاء موصلاته مع الملفات أو عوازل إختراق المحول (**Bushings**) ويجب التقصي عنها و إصلاحها وذلك بعد مراسلة الشركة المُصنِّعة ومراعاة توصياتها.

ومن الأمور التي يُنصح بها في حال وجود مُغيّر خطوة (**Tap-Changer**) عمل تمرين (**Exercise**) من فترة لأُخرى صعوداً ونزولاً للخطوات (**Taps**) كافة من مرتين إلى ستة مرات سنوياً وذلك للتخلص من تأكسد الملامسات، أما في ما يَخُص تآكلها أو أية أعراض أُخرى للتقادم يجب مراعاة عمل الصيانات الشاملة (**Overhauls**) في مواعيدها المحددة من قبل مُصَنِّع مُغيّر الخطوة (**Tap-Changer**) وإستبدال هذه الملامسات بأخرى جديدة في حال لزم الأمر.



ملحوظة (3-5): في حال وجود مُغيّر خطوة من نوع (**OCTC or DETC**) ولم يتم تغير وضعيته لفترة طويلة (أي أنه بقي على خطوة محددة لفترة طويلة من الزمن بالسنوات)، لا يُنصح بعمل تمرين (**Exercise**) لهذا النوع من مُغيرات الخطوة لما تنطوي عليه هذه العملية من مخاطر تتمثل في إحداث عطل لهذا المُغيّر نحن في غنى عنه.

9. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل من شأنها التأثير على قيمة فحص مقاومة الملفات أو قد تزيد من صعوبة إجراء هذه الفحص وجَبَ ذِكرها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل عند إجراء هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

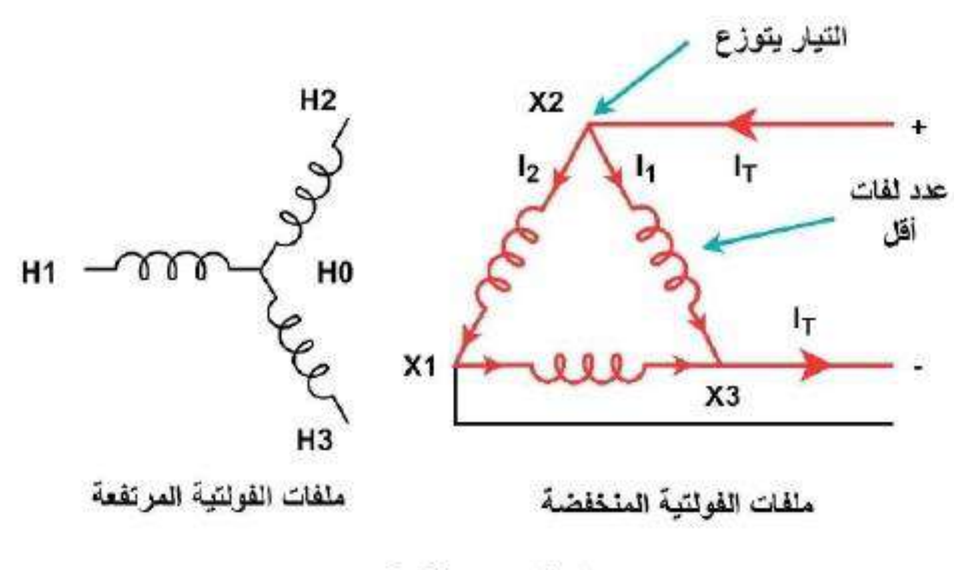
9.1 تيار الفحص – Test Current

كما هو معلوم أن تيار الفحص له تأثير مباشر على مُدة الفحص ومدى دقته، لذلك يجب إختيار مستوى هذا التيار بعناية شديدة وفقاً للعديد من المعايير كحجم المحول ومقدار تياره الإسمي وطريقة توصيل ملفاته داخلياً وغيرها من المعايير، ففي حال زادت قيمة تيار الفحص عن نسبة مُعيّنة من قيمة التيار الإسمي للملفات فإن ذلك من شأنه رفع درجة حرارة هذه الملفات والتسبب بإختلاف قيمة المقاومة المُقاسة، حيث حددت معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات هذه النسبة بـ(**15%**) بالمئة من قيمة التيار الإسمي للملفات [**IEEE Std C57.152-2013**]. وعلى النقيض أيضاً وفي حال كانت قيمة تيار الفحص قليلة فإن ذلك سيؤدي إلى صعوبات في الفحص نتيجة لعدم وصول القلب الحديدي لحالة التشبُّع المغناطيسي وعدم إستقرار قيمة المقاومة كما سيتم شرحه في النقطة (**9.3**).

9.2 ملفات المحول الموصولة على شكل مثلث – Delta Connected Winding

في حال فحص ملفات المحول الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**) وخاصة إذا كانت هذه الملفات ذات الفولتية المنخفضة (**LV winding**) فإن ذلك من شأنه زيادة تعقيد هذا الفحص للأسباب التالية:

- **صعوبة الوصول لحالة تشبّع القلب الحديدي للمحول؛** عند فحص هذا النوع من الملفات وتبعاً لقلة عدد اللفات الخاصة بها (**LV winding**) مقارنة بملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**)، بالإضافة لتوزّع التيار بين الملفات الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**) كما هو مبين بالشكل (**3-30**)، فإن ذلك من شأنه زيادة صعوبة الوصول لحالة تشبُّع القلب الحديدي للمحول، حيث أن قوة التمغنُط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية (**Magnetomotive Force - MMF**) التي من شأنها وصول القلب الحديدي لحالة التشبّع المغناطيسي تعتمد على عدد اللفات والتيار ($I.N$) حيث (N) تُمثل عدد اللفات و (I) تُمثل التيار. وفي هذه الحالة يتم اللجوء لبعض الطُرق كرفع تيار الفحص أو زيادة عدد الملفات كما سيتم شرحه في النقطة (**9.3**).



الشكل رقم (**3-30**)

- **الزمن الطويل حتى تستقر قيمة التيار؛** عند فحص ملفات المحول الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**) تكون المقاومة المُقاسة أقل من المقاومة الفعلية للملفات بمقدار النصف تقريباً كما تم شرحه سابقاً في هذا الفصل، نتيجة لذلك فإن المُعامل الزمني اللازم لإستقرار التيار (t) والذي يساوي حاصل قسمة (L/R) سوف يزداد مؤدياً لزمن أطول حتى يستقر التيار وإستخراج قيمة مقاومة الملفات كما هو موضح في الشكل (**3-4**).

ومن الأسباب الأُخرى لعدم إستقرار التيار عند فحص محول ذو مجموعة توصيل (**Delta - Δ**) هو أن هذه التوصيلة تسلك سلوك مشابه لدائرتي محاثة مغلقتين حيث أن الطاقة المضافة لهذه الدوائر والتي تكون على شكل تيار ثابت (**DC**) تبدء بالدوران داخل هذه الدوائر المغلقة مما يزيد من زمن الوصول لحالة الإستقرار كما ورد في الكتيب التفصيلي الصادر عن شركة ميجر **[MEGGER, AVTM830280 Rev.C]**. لذلك قد تلجأ بعض مختبرات الفحص لفتح دائرة

الملفات الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**) بطريقة ما إن أمكن ذلك لتسهيل عملية فحص مقاومة هذه الملفات.

9.3 التشبُّع المغناطيسي للقلب الحديدي – Iron Core Saturation

من الشروط الأساسية التي يجب مراعاتها للحصول على قيمة مقاومة ملفات دقيقة و الوصول لحالة إستقرار تيار وفولتية الفحص هي تشبُّع القلب الحديدي للمحول (**Core saturation**) كما ذُكر سابقاً في فقرة فلسفة الفحص، لذلك من كُبرى الصعوبات التي تظهر أثناء فحص مقاومة الملفات الخاصة بالمحول هي عدم القدرة للوصول لحالة تشبُّع القلب الحديدي، خاصة في حالة قياس مقاومة ملفات الفولتية المنخفضة الموصولة على شكل مثلث (**Delta LV winding**) كما تم شرحه في النقطة (**9.2**) سابقة الذِكر.

ومما يزيد الأمر تعقيداً صعوبة معرفة فيما إذا وصل القلب الحديدي لحالة التشبُّع أم لا، وللحد من مشكلة عدم تشبُّع القلب الحديدي للمحول يُمكن القيام بإحدى الطرق الآتية:

- **زيادة قيمة تيار الفحص (DC Current)**

عند قياس مقاومة ملفات فولتية منخفضة (**LV winding**) لمحول وكانت قيمة المقاومة متذبذبة لمدة طويلة وكان التيار المحقون قيمته (**1%**) بالمئة من التيار الإسمي مثلاً، في هذه الحالة أحد الاحتمالات المُسببة لهذه الحالة هو عدم وصل القلب الحديدي لحالة التشبُّع لذلك يجب زيادة التيار المحقون مثلاً إلى (**5%**) على أن لا تتجاوز ما مقداره (**15% - 10%**) من التيار الاسمي للملفات، وبذلك تكون قوة التمغنط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية (**Magnetomotive Force - MMF**) إزدادت إلى قرابة الـ **5** أضعاف كما هو مُبين بالمعادلة (**3.20**)، وعندها يُمكن الوصول الى حالة التشبُّع للقلب الحديدي للمحول ويُمكن تسجيل قيمة مقاومة الملفات بعد ثباتها

$$MMF = N.I \tag{3.18}$$

بعد زيادة التيار خمس أضعاف تُصبح المعادلة

$$MMF = N.(5I) \tag{3.19}$$

$$MMF = 5\,N.I \tag{3.20}$$

حيث؛

MMF : قوة التمغنط أوكما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية. (أمبير.لفة)

N : عدد اللفات. (لفة)

I : التيار. (أمبير)

- **زيادة قيمة فولتية الفحص (DC Voltage)**

يعتمد الزمن اللازم للوصل إلى حالة تشبُّع القلب الحديدي للمحول على مستوى فولتية الملفات، فيحساب (**Volt-seconds**) للملفات يُمكن معرفة الزمن والفولتية اللازمة للوصل إلى حالة التشبُّع، بحيث يتم إحتساب هذه القيمة (**Volt-seconds**) عن طريق تكامل المساحة تحت نصف دورة لموجة الفولتية وقسمتها على (**2**)، فمثلاً لمحول كهربائي فولتية ملفاته الإسمية (**100kV**) كيلو فولت وتردده (**50Hz**) هيرتز فإنه بحاجة لقرابة (**450 Volt-seconds**) فولت-ثانية حتى الوصول إلى حالة التشبُّع، أي إذا قمنا بتطبيق فولتية مقدارها (**30V**) فولت سنحتاج لزمن مقداره قرابة الـ(**15s**) ثانية للوصول إلى حالة التشبّع، كما وتّجدُر الإشارة إلى إختلاف هذه القيمة تبعاً لمقدار المغناطيسية المتبقية في القلب الحديدي (**Residual Magnetism**) كما ورد في **[O. W. Iwansiw, The art and science of measuring the winding resistance of power transformers]**.

لذلك وللوصول إلى حالة التشبُّع المغناطيسي للقلب الحديدي للمحول يُمكن زيادة قيمة فولتية الفحص، حيث بزيادة هذه الفولتية يزداد مقدار الفيض المغناطيسي كما هو مبين بالمعادلة (**3.21**) التالية:

$$\varphi = V\,.T \qquad (3.21)$$

حيث؛

φ : الفيض المغناطيسي. (فولت.ثانية)

V : الفولتية. (فولت)

T : الزمن. (ثانية)

وكما هو معلوم أن قوة التمغنط أو كما تُسمى القوة الدافعة المغناطيسية (**MMF**) المسؤولة عن تشبُّع القلب الحديدي للمحول تعتمد على مقدار الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي كما هو موضح في المعادلة التالية:

$$MMF = \varphi\,.\Re \qquad (3.22)$$

$$MMF = V\,.T\,.\Re \qquad (3.23)$$

حيث؛

MMF : قوة التمغنط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة الغناطيسية.

V : الفولتية.

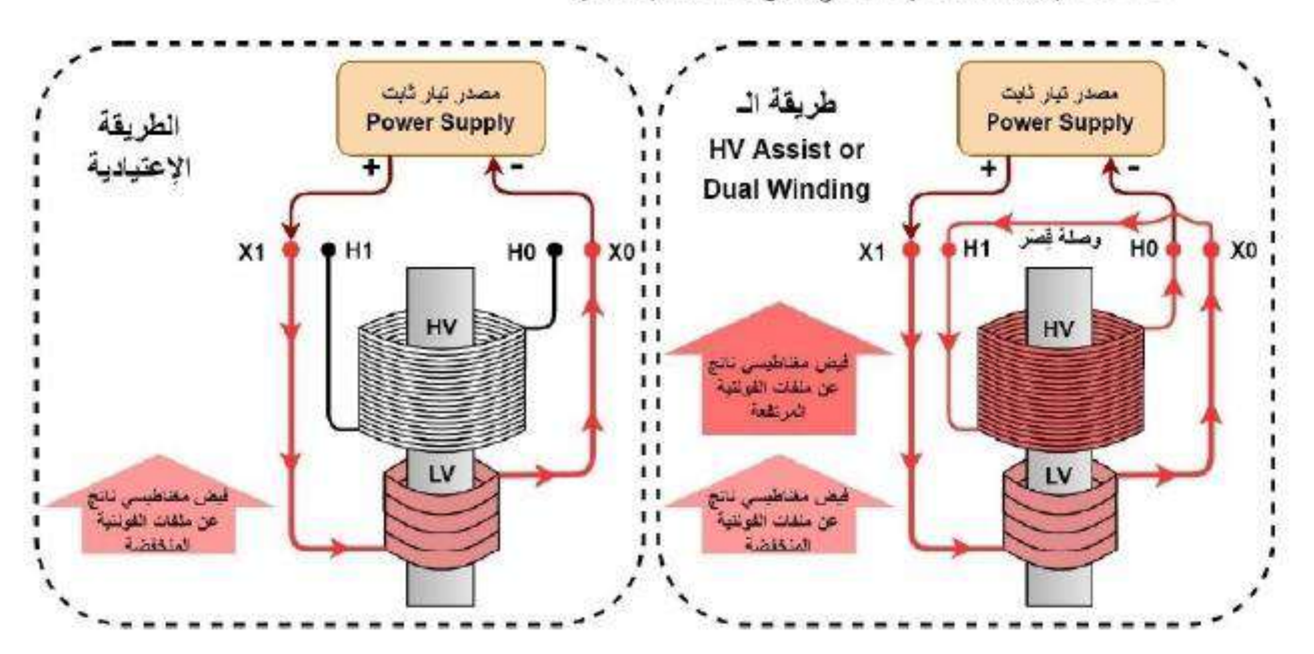
T : الزمن.

$\Re$: الممانعة المغناطيسية (**Reluctance**).

- **زيادة عدد اللفات**

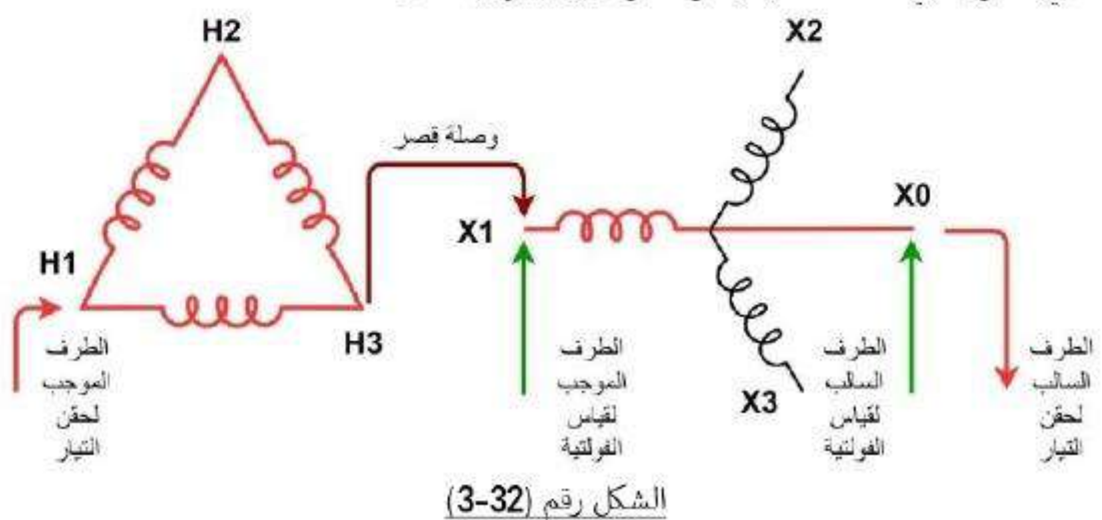
إن عدد اللفات المحقونة بتيار الفحص يتناسب مع قوة التمغنط للقلب الحديدي لذلك تُعد زيادة عدد هذه اللفات من الأمور المُساعدة للوصول لحالة التشبُّع المغناطيسي و يُكون ذلك بطريقتين :

○ **الطريقة الأولى:** وذلك بمساعدة ملفات الفولتية المرتفعة أو ما يُسمى بطريقة الـ(**HV assist**) أو طريقة الـ(**Dual winding**)، حيث يتم وصل ملف الفولتية المرتفعة (**HV winding**) للمحول مع ملف الفولتية المنخفضة (**LV winding**) لنفس الطور على التوالي مع مراعاة قُطبية الملفات (**Polarities**) كما هو مُبين بالشكل (**3-31**).



الشكل رقم (**3-31**)

حيث أن إستخدام هذه الطريقة يزيد من عدد اللفات المحقونة بتيار الفحص، وكما هو معلوم أن قوة التمغنط أو كما تُسمى بالقوة الدافعة المغناطيسية (**Magnetomotive Force – MMF**) تزداد بزيادة عدد اللفات (*N*) كما هو مبين بالمعادلة (**3.18**) السابقة والذي بدوره يؤدي إلى الوصول إلى حالة تشبُّع القلب الحديدي بشكل أسرع وأيضاً يُتيح قياس مقاومة ملفين في نفس الوقت كما هو موضح في الشكل (**3-32**)، فإلى جانب قياس الفولتية على أطراف الملف (**X1 - X0**) يُمكن أيضاً قياس الفولتية على أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (**H1 – H3**) وحساب قيمة مقاومة هذا الملف أيضاً، حيث أن الشكل التالي يوضح إستخدام هذه الطريقة (**Dual winding**) عند فحص محول ثلاثي الطور ثنائي الملفات ذو مجموعة توصيل (**Dyn1**) كمثال.



الشكل رقم (**3-32**)

عادةً ما يتم إستخدام هذه الطريقة مع المحولات ذات مجموعة التوصيل (Δ - Δ)، حيث أنه كما ورد في [MEGGER, AVTM830280 Rev.C] فإن إستخدام هذه الطريقة لمحول من هذا النوع ذو سعة **Capacity** حوالي (**300kVA**) كيلو فولت أمبير تقلل زمن الفحص من (**14 min**) دقيقة إلى (**30s**) ثانية.

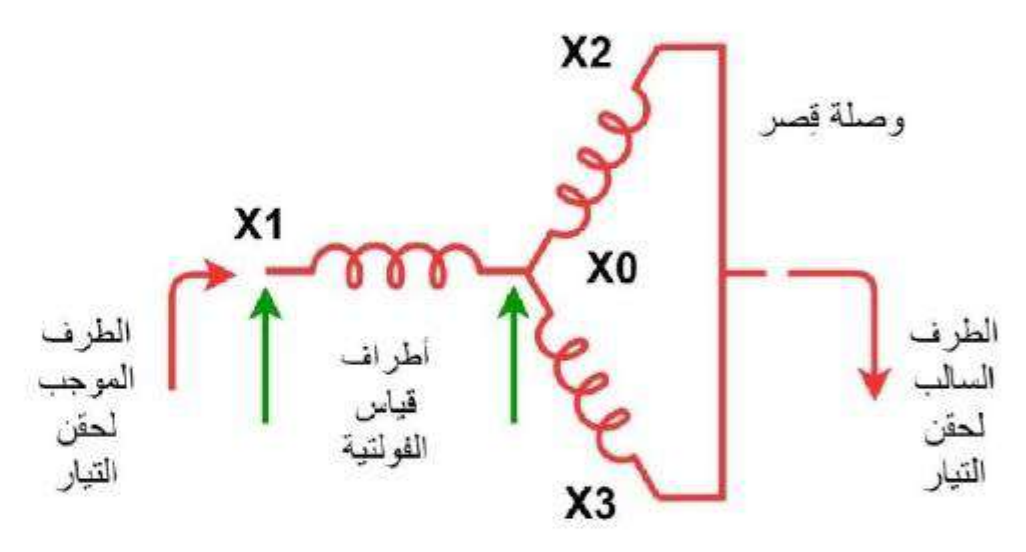
الجدول (**3-3**) يوضح النقاط التي يجب حقن التيار بها و النقاط التي يجب قياس الفولتية عندها في حال تطبيق هذه الطريقة (**Dual winding**) لبعض مجموعات التوصيل (**Vector group**).

الجدول رقم (**3-3**)

مجموعة التوصيل	أطراف حقن التيار و قصر الأطراف			قياس فولتية 1		قياس فولتية 2	
	+	الاطراف المقصورة	-	+	-	+	-
YNd1	H1	H0-X1	X2	H1	H0	X1	X2
	H2	H0-X2	X3	H2	H0	X2	X3
	H3	H0-X3	X1	H3	H0	X3	X1
Dyn11	H1	H2-X1	X0	H1	H2	X1	X0
	H2	H3-X2	X0	H2	H3	X2	X0
	H3	H1-X3	X0	H3	H1	X3	X0

*فيما يخُص باقي مجموعات التوصيل يُمكن الرجوع للملحق رقم (**1-3**)

- **الطريقة الثانية**: وتُسمى بطريقة إعادة توجيه التيار (**Re-Directing Current**) وهي خاصة بالملفات الموصولة على شكل نجمة (**Star - Y**) وذلك بعمل وصلة قِصَر (**Short circuit**) على الملفين الآخَرين لتوصيلة النجمة بحيث يكون مدخل التيار من الملف المُراد فحص مقاومته ومخرج التيار من نقطة القِصَر بين الملفين الآخرين مع قياس الهبوط في الفولتية على الملف المُراد فحصه فقط (**X1-X0**) كما هو مُبين بالشكل (**3-33**).



الشكل رقم (**3-33**)

9.4 تأثير درجة حرارة الملفات – Winding Temperature

يُعد التغيُّر في درجة حرارة ملفات المحول من العوامل التي تؤثر على قيمة مقاومة الملفات، حيث أن تَغيُّر في درجة حرارة الملفات النحاسية بمقدارة درجة مئوية واحدة فقط يؤدي إلى تَغيُّر في قيمة المقاومة بمقدار **(0.39%)** بالمئة.

لذلك يجب مراعاة الأمور التالية:

- ✓ **درجة حرارة المحول:** يجب التأكد من إستقرار المحول حرارياً قبل إجراء الفحص كما تم شرحه مسبقاً في فقرة الأمور التي يجب مراعاتها قبل البدء بالفحص.
- ✓ **وقت الفحص:** يُنصح بعمل الفحص في الأوقات التي تكون فيه درجة الحرارة الجوية غير مُتقلّبة.
- ✓ **مُدة الفحص:** تعتمد مُدة الفحص على طريقة الفحص المستخدمة وعادةً ما نحتاج من ساعة إلى ساعتين بين أول قراءة وآخر قراءة يتم قياسها أثناء فحص مقاومة الملفات خاصة في حال وجود مُغيّر خطوة **(Tap Changer)**، وهذا الوقت المُستغرق في إجراء الفحص يسمح بحدوث إختلاف في درجة حرارة الملفات غير مرغوب به بين أول وآخِر قراءة لذلك يجب تقليل زمن الفحص قدر الإمكان، وللتأكد من عدم تَغيُّر درجة الحرارة يجب أخذ درجة حرارة الملفات قبل وبعد الفحص.
- ✓ **تيار الفحص:** إن زيادة قيمة تيار الفحص فوق القِيَم المسموح بها وهي **(15%)** بالمئة من التيار الإسمي بُغية الوصول إلى حالة التشبُّع المغناطيسي للقلب الحديدي قد يؤدي إلى إرتفاع في درجة حرارة الملفات مما يؤثر سلباً على قيمة المقاومة المُقاسة كما تم شرحه سابقاً.

9.5 حجم المحول

تتناسب قيمة مقاومة ومحاثة ملفات المحول تناسباً طردياً مع مُربع الفولتية الإسمية للملفات وعكسياً مع سعة المحول، حيث أن ملفات الفولتية المرتفعة **(HV winding)** تحتوي على عدد لفات أكبر وهذا يعني قيمة محاثة ومقاومة أكبر، والعكس بالعكس فيما يَخُص ملفات الفولتية المنخفضة **(LV winding)** فإنها تحتوي على عدد لفات أقل مما يعني قيمة محاثة ومقاومة أقل لهذه الملفات.

9.6 فحص آحادي الطور أو ثلاثي الطور

يُمكن إجرا ء هذه الفحص بالطريقة آحادية الطور **(Single phase)** أي بإستخدام مصدر تيار ثابت واحد فقط بحيث يتم فحص الملفات واحداً تلو الآخر كما تم شرحه سابقاً أو بالطريقة ثلاثية الطور أي بإستخدام ثلاثة مصادر للتيار الثابت بفحص ملفات الأطوار الثلاثة بنفس الوقت، الجدول **(4-3)** يَحوي مقارنة بين الطريقتين فيما يَخُص أبرز الخصائص.

الجدول رقم (4-3)

ثلاثي الطور Three Phase	آحادي الطور Single Phase	وجه المقارنة
يُمكن تطبيقه على الملفات الموصولة على شكل نجمة (Star-Y) فقط	يُمكن تطبيقه على الملفات الموصولة على شكل مثلث (Delta-Δ) ونجمة (Star-Y)	توصيلة الملفات تحت الفحص
أقل	أكبر	مدة الفحص
بحاجة لثلاثة مصادر	بحاجة لمصدر واحد فقط	مصدر التيار الثابت
لا يُمكن إستخدامها	يُمكن إستخدامها هنا	طريقة **Dual winding**
في بعض الأحيان أقل من نظيرتها آحادية الطور	-	نسبة الخطأ

9.7 تأثير محولات الفولتية والتيار – Voltage and Current Transformers

إن وجود محول فولتية (Voltage Transformer – VT) على طور واحد من أطوار المحول قد يزيد من مقاومة هذا الطور وقد يُسبب بعض المشاكل عند تحليل قِيَم نتائج فحص مقاومة الملفات وذلك عند المقارنة في قيم المقاومات بين الأطوار.

أما فيما يَخُص محولات التيار (Current Transformers – CT's) فإن المُستخدَم منها عادةً مع عوازل الإختراق (**Bushings**) المحول هي من النوع الحلقي (**Ring type**) والتي بدورها لا تؤثر على قيمة المقاومة، ولكن في حال إستخدام محول تيار ثنائي الملفات على أحد أطوار المحول فسيكون له نفس التأثير السابق فيما يخص محول الفولتية.

10. فحوصات إضافية داعِمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص و تحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول و الذي قد يتطلب التواصل مع مُصنِّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص مقاومة الملفات (**WRM**) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية مما يَعني وجود قطع كُلّي أو جزئي للملفات أو وجود قِصَر بين اللفات أو وجود نقاط توصيل رديئة أو أية أعطال أخرى في مُغيّر الخطوة، لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات

التصحيحية ومنها فحص الإستجابة الترددية للخسائر الشاردة (Frequency response of stray losses FRSL) بالإضافة لفحص الغازات الذائبة بالزيت (Dissolved Gas Analysis - DGA) وملاحظة ارتفاع نسب ثلاث غازات مُجتمعة وهي غازات إحماء المعدن (Hot metal gasses) و المُكّونة من الغازات التالية (الميثان – CH_4 و الإيثان – C_2H_6 و الإيثيلين – C_2H_4) والتي تُعطي إنطباع عن حدوث إحماء في موصلات الملفات ناتج عن إرتفاع في قيمة المقاومة.

11. تفريغ الملفات و إزلة تَمَغنُط القلب الحديدي

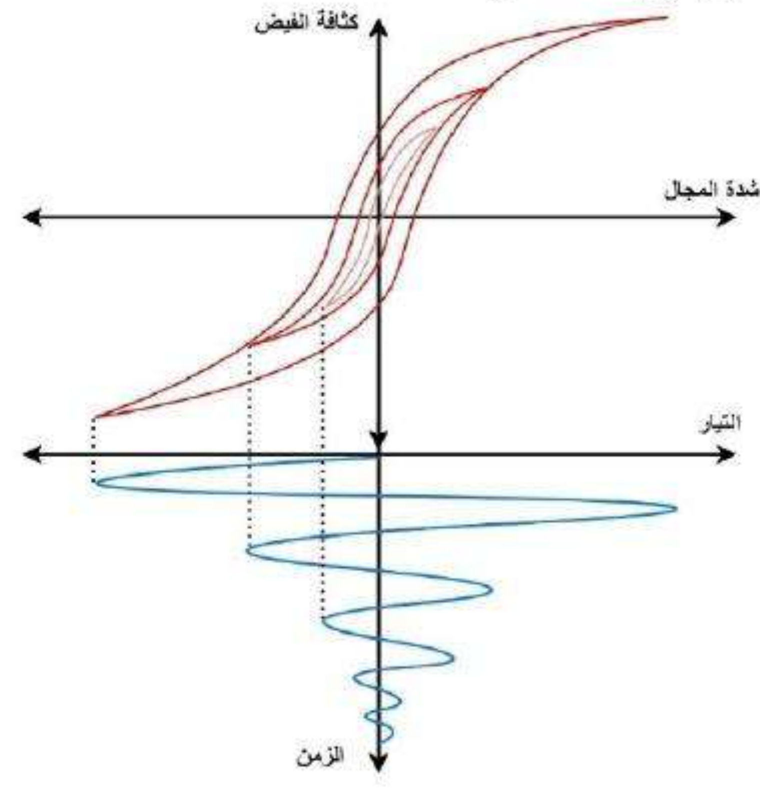
عادةً بعد فحص مقاومة العزل (Insulation Resistance - IR) وفحص مقاومة ملفات (Winding Resistance Measurement - WRM) أي عموماً بعد الفحوصات التي يتم من خلالها تطبيق فولتية وتيار ثابت (DC) والتي بدورها تقوم بشحن ملفات المحول (Winding Trapped Charge) وكذلك تؤدي لتَمَغنُط القلب الحديدي للمحول أو ما يُسمى بال(Core Magnetization)، فإنه من الضروري تفريغ شحنة الملفات (Winding Discharge) للإنتقال من ملف لآخر وكذلك إزالة تَمَغنُط القلب الحديدي (Core De-magnetization) بعد الإنتهاء من الفحص وقبل كهربة المحول (Transformer energization) أو إجراء فحوصات أُخرى وذلك تجنباً لحدوث الظواهر التالية:

- ✓ حدوث صدمة حثية (Induction Kickback) ناتجة عن الطاقة المخزنة في محاثة ملفات المحول ($E = \frac{1}{2}\ I^2 L$) والتي قد تنطوي على مخاطر من شأنها التأثير على الأشخاص و المُعدات.
- ✓ ظهور تيارات عالية غير إعتيادية (High Inrush Current) عند كهربة المحول (Transformer Energization) والتي قد تصل لقيمة تيار القِصَر الأعظم في بعض الاحيان (Maximum Short-circuit Current) وتؤدي لعمل خاطئ لمرحلات الحماية الكهربائية.
- ✓ ظهور نتائج غير دقيقة عند تطبيق الفحوصات التالية:
  - الإستجابة الترددية للخسائر الشاردة - Frequency Response of stray losses FRSL
  - نسبة لفات المحول - Transformer Turns Ratio TTR
  - مُفاعلة التسرُب - Transformer Leakage Reactance
  - تيار التهييج - Transformer Excitation Current
  - تحليل الإستجابة الترددية المَسحي – Sweep Frequency Response Analysis

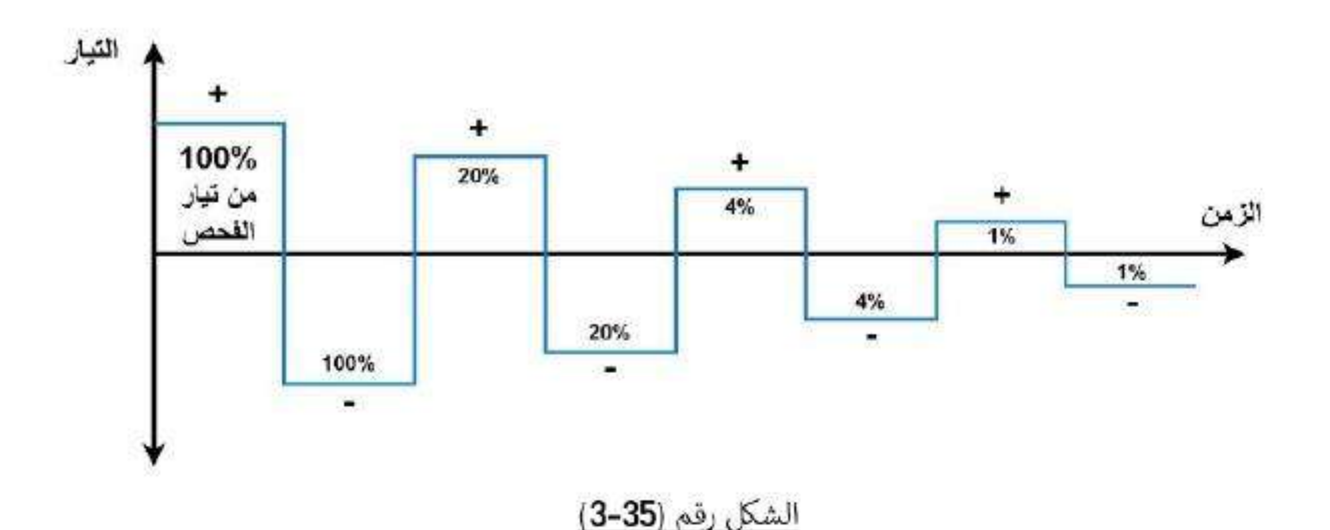
لذلك يجب تفريغ الطاقة المخزنة في الملفات (Winding Discharge) عند الإنتقال من ملف لآخر وبعد الإنتهاء من الفحص تماماً وذلك عن طريق قَصر (Short circuit) أطراف ملفات المحول ووصلها بالأرض لفترة زمنية مناسبة وتُقَدّر بأربعة أضعاف زمن تطبيق الفولتية الثابتة على الملفات أثناء الفحص أو قُرابة الـ 30 ثانية كما هو مذكور في بعض المراجع والمعايير، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة والمُصنعة بواسطة شركة (MEGGER, OMICRON & METREL) تقوم بالتفريغ تلقائياً بعد الإنتهاء من إجراء الفحص.

أما فيما يَخُص إزالة تَمَغنُط القلب الحديدي للمحول (**Core De-magnetization**) فإنه يتم بعدة طُرق وهي:

- ✓ **طريقة التسخين:** في هذه الطريقة يتم تسخين المادة المُراد إزالة تمغنطها لدرجة حرارة فوق درجة حرارة كيوري (**Curie Temperature**)، وهي درجة الحرارة التي تفقد عندها المادة خصائصها المغناطيسية فمثلاً للحديد المُكون للقلب الحديدي تساوي (**770°**) درجة مئوية. ولكن هذه الطريقة لا يُمكن إستخدامها في المحولات نظراً لخطورتها على المادة العازلة.
- ✓ **طريقة حقن تيار متناقص:** في هذه الطريقة يتم حقن تيار متناقص في الملفات حتى الوصول إلى حالة عدم المغنطة ويتم ذلك بطريقتين وهي طريقة التيار المتردد (**AC**) كما هو موضح في الشكل (**3-34**) وهي طريقة قد تنطوي على بعض المخاطر فيما يَخُص السلامة العامة نظراً لإرتفاع قيمة الفولتية المتناقصة، وعادة ما يتم إجراء هذه الطريقة في المختبرات المُجهزة ونادراً ما يتم عمل هذه الطريقة في الموقع، لذلك يتم اللجوء لطريقة التيار الثابت (**DC**) متردد القطبية (**Alternating polarities**) والمتناقص مع الزمن إلى حين التخلص من تَمَغنُط القلب الحديدي للمحول كما هو موضح بالشكل (**3-35**) وذلك حسب معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE Std C57.152-2013**] حيث أن هذه الطريقة لا تحتاج لفولتية مرتفعة كنظيرتها للتيار المتردد سابق الذكر، وعادةً أجهزة الفحص الحديثة مثل (**TESTRANO by OMICRON**) و (**MTO by MEGGER**) تقوم بإزالة تَمَغنُط القلب الحديدي (**De-magnetization**) بشكل تلقائي أو يدوي بعد الإنتهاء من إجراء الفحوصات التي تعتمد تطبيق فولتية وتيار ثابت (**DC**) على ملفات المحول كفحص مقاومة الملفات (**WRM**) كما هو مُبين بالملحق (**3-5**) في نهاية هذا الفصل.



الشكل رقم (**3-34**)



الشكل رقم (3-35)

12. أمثلة على نتائج فحوصات مَصنعيّة

12.1 المثال الأول: الشكل (3-36) يُبين قِيَم فحص مقاومة ملفات مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three Phase Two Windings**) موصول بطريقة (**YNd11**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**DETC or OCTC**).

Acceptance
Test Certificates

Customer :	MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE		Page No:
			Serial No.:
	Standard :	IEC 60076-1	Report No.:
Rated Power(MVA): 100 / 135	Rated Voltage(kV):	420 / 15	Vector Group: YNd11

HV Windings			(mohm)	LV Windings			(mohm)
Temperature: 24 °C				Temperature: 24 °C			
Pos.	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1	Pos.	X1-X2	X2-X3	X3-X1
1	3,1870	3,1943	3,1805	-	2,8913	2,9271	2,9127
2	3,1443	3,1422	3,1371				
3	3,0970	3,1027	3,0928				
4	3,0543	3,0570	3,0470				
5	3,0101	3,0170	3,0122				

الشكل رقم (3-36)

12.2 المثال الثاني: الشكل (**3-37**) يُبين قِيَم فحص مقاومة ملفات مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three Phase Two Windings**) موصول بطريقة (**Dyn1**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**OLTC**).

Acceptance
Test Certificates

Customer :		MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE		Page No:	
				Serial No.:	
		Standard :	IEC 60076-1	Report No.:	
Rated Power(MVA):	25 / 30	Rated Voltage(kV):	15 / 6,6	Vector Group:	Dyn1

HV Windings			(mohm)	LV Windings			(mohm)
Temperature:	26 °C			Temperature:	26 °C		
Pos.	H1 - H2	H2 - H3	H3 - H1	Pos.	X1 - X2	X2 - X3	X3 - X1
1	26,195	26,079	26,214	-	3,3828	3,3979	3,4314
2	25,695	25,514	25,779				
3	25,214	25,162	25,345				
4	24,714	24,618	24,828				
5	24,325	24,225	24,430				
6	23,795	23,635	23,879				
7	23,435	23,285	23,495				
8	22,979	22,779	23,008				
9	22,546	22,400	22,615				
10	22,912	22,779	23,079				
11	23,435	23,285	23,495				
12	23,795	23,660	23,881				
13	24,325	24,225	24,430				
14	24,714	24,618	24,828				
15	25,275	25,162	25,345				
16	25,615	25,524	25,718				
17	26,131	26,085	26,284				

الشكل رقم (**3-37**)

12.3 المثال الثالث: الشكل (**3-38**) يُبين قِيَم فحص مقاومة ملفات مصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي ملفات (**Three Phase Tertiary Windings**) موصول على شكل (**Dd0-d0**) ذو مُغيِّر خطوة من نوع (**DETC or OCTC**).

Measurement of winding resistance Oil temperature: 21 ℃

Winding	Tapping	$R_{AB}(\Omega)$	$R_{BC}(\Omega)$	$R_{CA}(\Omega)$	Unbalance rate (%)
HV winding	1	0.014098	0.014102	0.014111	
	2	0.013702	0.013763	0.013730	
	3	0.013357	0.013348	0.013355	
	4	0.012966	0.012963	0.012963	
	5	0.012698	0.012598	0.012602	
LV1 winding	Tapping	Ra1b1(Ω)	Rb1c1 (Ω)	Rc1a1 (Ω)	Unbalance rate (%)
	/	0.009098	0.009055	0.009098	
LV2 winding	Tapping	Ra2b2(Ω)	Rb2c2 (Ω)	Rc2a2 (Ω)	Unbalance rate (%)
	/	0.009163	0.009146	0.009165	

الشكل رقم (**3-38**)

الملحق (1-3)

الأطراف التي يجب قصرها والأطراف التي يجب القياس عليها عند تطبيق طريقة **(HV assist)** أو ما يُسمى بطريقة الـ**(Dual windings)** لمجموعات التوصيل المختلفة وذلك لزيادة عدد اللفات الحاملة لتيار الفحص **[MEGGER, AVTMTO210 Rev.5]**.

مجموعة التوصيل	أطراف حقن التيار و قصر الأطراف			قياس فولتية 1		قياس فولتية 2	
	+	الاطراف المقصورة	-	+	-	+	-
Dd0	H1	H3-X1	X3	H1	H3	X1	X3
	H2	H1-X2	X1	H2	H1	X2	X1
	H3	H2-X3	X2	H3	H2	X3	X2
Dyn7	H1	H3-X0	X1	H1	H3	X0	X1
	H2	H1-X0	X2	H2	H1	X0	X2
	H3	H2-X0	X3	H3	H2	X0	X3
Dyn1	H1	H3-X1	X0	H1	H3	X1	X0
	H2	H1-X2	X0	H2	H1	X2	X0
	H3	H2-X3	X0	H3	H2	X3	X0
YNyn0	H1	H0-X1	X0	H1	H0	X1	X0
	H2	H0-X2	X0	H2	H0	X2	X0
	H3	H0-X3	X0	H3	H0	X3	X0
YNd1	H1	H0-X1	X2	H1	H0	X1	X2
	H2	H0-X2	X3	H2	H0	X2	X3
	H3	H0-X3	X1	H3	H0	X3	X1
Dy1	H1	H3-X1	X2	H1	H3	X3	X2
	H2	H1-X2	X3	H2	H1	X1	X3
	H3	H2-X3	X1	H3	H2	X2	X1
YNd7	H1	H0-X2	X1	H1	H0	X2	X1
	H2	H0-X3	X2	H2	H0	X3	X2
	H3	H0-X1	X3	H3	H0	X1	X3
Dyn5	H1	H2-X0	X1	H1	H2	X0	X1
	H2	H3-X0	X2	H2	H3	X0	X2
	H3	H1-X0	X3	H3	H1	X0	X3
Dy11	H1	H3-X1	X3	H1	H3	X1	X3
	H2	H1-X2	X1	H2	H1	X2	X1
	H3	H2-X3	X2	H3	H2	X3	X2
Dyn11	H1	H2-X1	X0	H1	H2	X1	X0
	H2	H3-X2	X0	H2	H3	X2	X0
	H3	H1-X3	X0	H3	H1	X3	X0

الملحق (2-3)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط ، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة ملفات المحول بإستخدام جهاز
Transformer Ohmmeter AVTM830280 by MEGGER



الشكل رقم (1-2-3)

يُعتبر هذا الجهاز من الإصدارات القديمة المُصنّعة بواسطة شركة (MEGGER) لفحص مقاومة ملفات المحولات، حيث وجب الحديث عنه لوجوده بالخدمة إلى الآن في بعض محطات التوليد و المصانع.

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(**Instruction Manual AVTM830280, Catalog No. 830280**)
  - قدرة المدخل : **120/240 V, 50/60 Hz, 350 VA**
  - آلية القياس : إلكترونية بواسطة دائرة ثومبسون.
  - آلية تزويد التيار : توليد وتحكم إلكتروني.
  - نطاق تيار المخرج : **5 mA, 50 mA, 500 mA, 5 A (dc)**
  - فولتية فحص (**OC**) : **30 V (dc)**
  - الحماية من إرتفاع الحرارة : إغلاق تلقائي مع وجود لمبة إشارة تحذيرية عند تخطي حدود الحرارة المسموح بها على نطاق التيار (**5 A**).
  - مدخل قياس المقاومة : مدخلين منفصلين ذو ممانعة مرتفعة، لكل منهما نطاق مختلف عن الآخر وأيضاً توجد حماية من شرارة القوس الكهربائي الناتجة عن الـ(**Inductive kick**).

- نطاق المقاومات المُقاسة : حسب الجدول التالي.

Maximum Display	Resolution	Nominal
1.999 mΩ	0.001 mΩ	2 mΩ
19.99 mΩ	0.01 mΩ	20 mΩ
199.9 mΩ	0.1 mΩ	200 mΩ
1.999 Ω	0.001 Ω	2 Ω
19.99 Ω	0.01 Ω	20 Ω
199.9 Ω	0.1 Ω	200 Ω
1999 Ω	1.0 Ω	2000 Ω

- الدقة : **± 0.5%**
- البيئة التشغيلية المحيطة : **32 to 104° F (0 to 40°C) RH to 80%**
- البيئة التخزينية المحيطة : **-40 to 149° F (-40 to +65°C)**
- أبعاد الجهاز : **280 H x 406 W x 267 D mm**
- وزن الجهاز : **Net 40 lb. (18 kg)**

- **خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:**

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**6.1** إلى **6.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة الملفات.

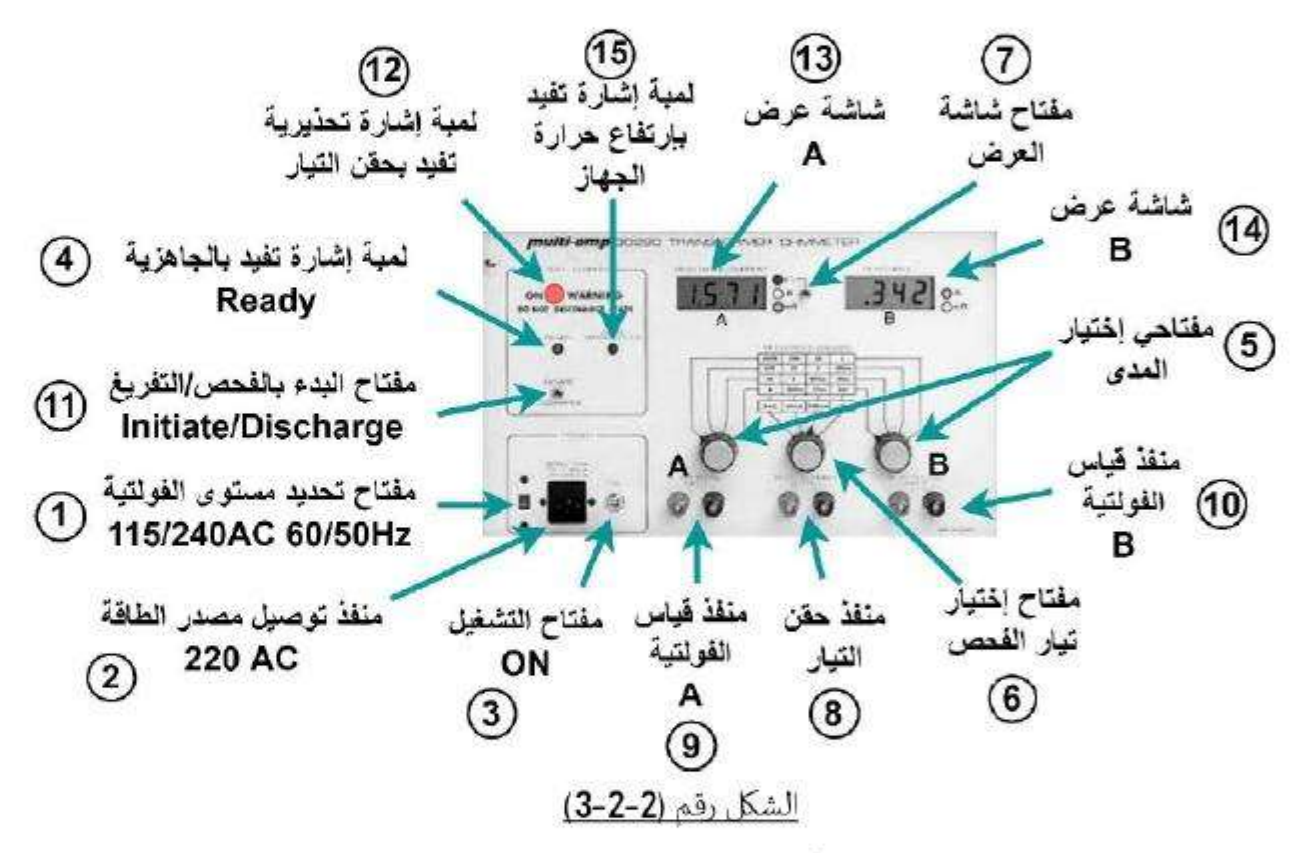
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.

3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.

4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.

5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).

6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مبين بالشكل (**3-2-2**).



الشكل رقم (3-2-2)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
   7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
   7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
   7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مُغلقة.
   7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
   7.5 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خَطِر.

8. إحضار جهاز الفحص (**AVTM830280**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**40°**) درجة مئوية.



تحذير: لا تستخدم جهاز الفحص في الأجواء القابلة للإنفجار (**Explosive** atmosphere).

9. تحديد مستوى فولتية المصدر المناسبة عبر المفتاح رقم (**1**) الظاهر في الشكل (**3-2-2**) بإختيار (**240VAC 50Hz**)، ومن ثم توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ (**2**).
10. التأكد من وضعية المفاتيح الظاهرة في الشكل (**3-2-2**) كالآتي:
   10.1 مفتاح التشغيل رقم (**3**) على وضعية (**OFF**).
   10.2 مفتاح شاشة العرض رقم (**7**) للأعلى.

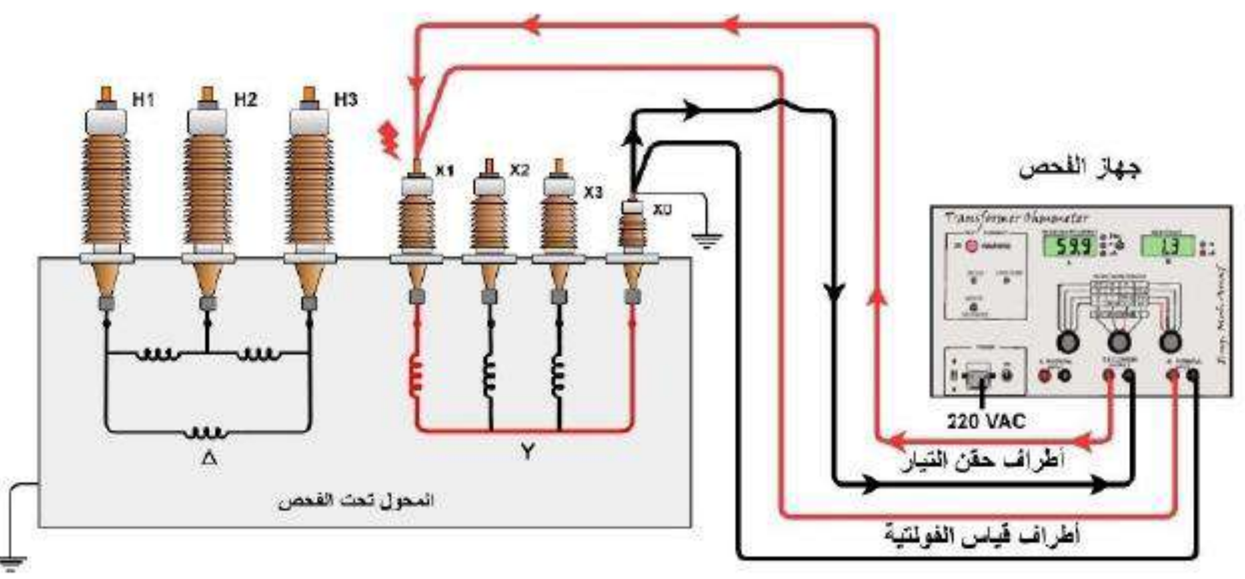
10.3 مفتاح إختيار المدى رقم **(5)(A)** أقصى اليسار.

10.4 مفتاح إختيار المدى رقم **(5)(B)** أقصى اليمين.

10.5 مفتاح إختيار التيار رقم **(6)**، يتم من خلاله تحديد قيمة تيار الفحص المُراد حقنه (**5mA, 50mA, 500mA, 5A**) وفقاً لقيمة مقاومة الملفات المُراد قياسها وقيمة التيار الإسمي لهذه الملفات.

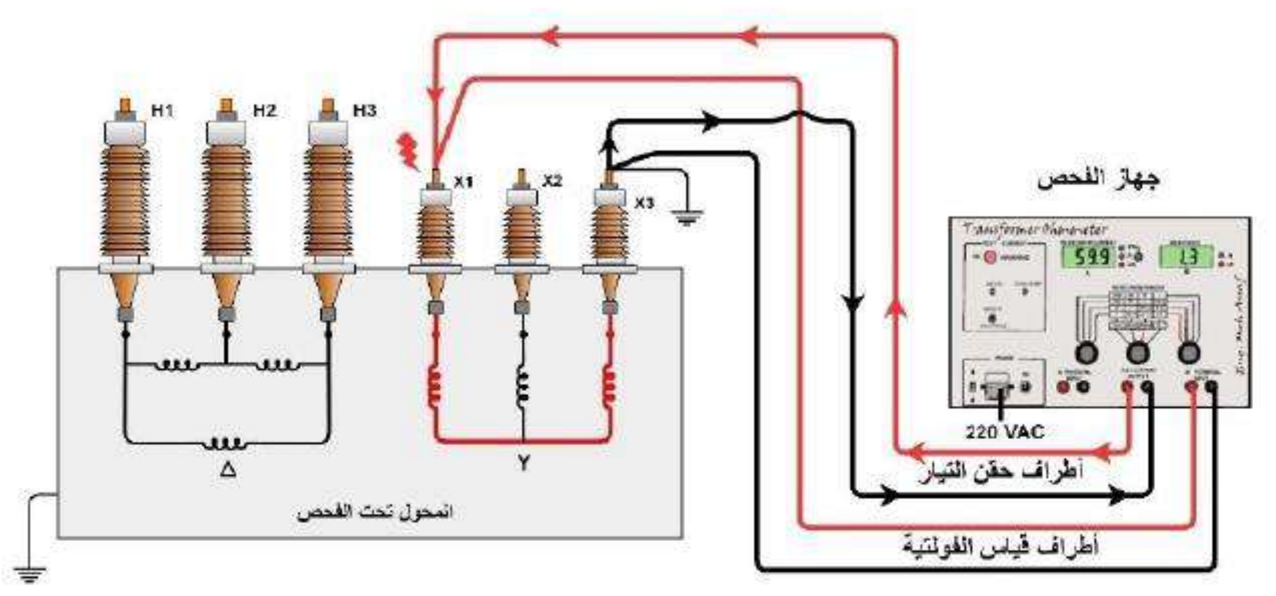
11. عمل توصيلة الفحص وفقاً لنوع الملفات المُراد فحصها كالآتي:

11.1 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل نجمة **(Star - Y)** مع إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل **(Accessible Neutral Point)**، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل **(3-2-3)** والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملف **(X1 – X0)**.



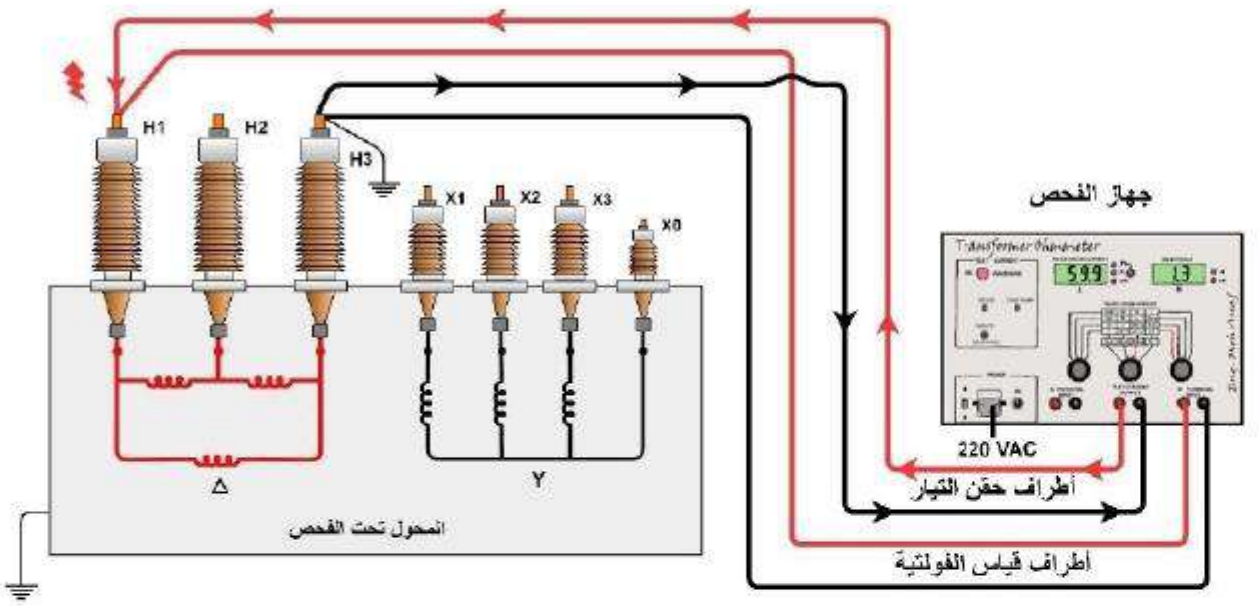
الشكل رقم **(3-2-3)**

11.2 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل نجمة **(Star - Y)** مع عدم إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل **(Not Accessible Neutral Point)**، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل **(3-2-4)** والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملفين **(X1 – X3)**، وللحصول على قيمة مقاومة الملف **(X1 – X0)** يتم قسمة القيمة المُقاسة على **(2)** وكذلك الحال للحصول على مقاومة الملف **(X3 – X0)**.



الشكل رقم (3-2-4)

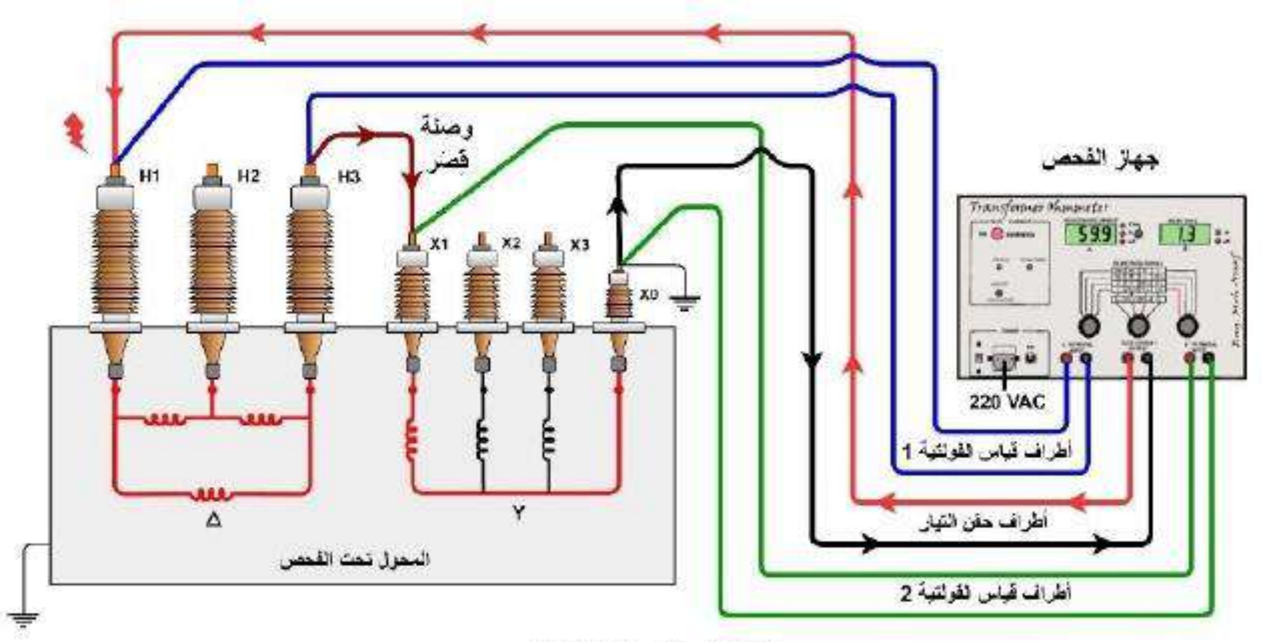
11.3 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل مثلث (Δ - Delta)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-2-5) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس المقاومة المُركّبة لتوصيلة المثلث (H1H3//(H1H2+H2H3)، وللحصول على قيمة مقاومة الملف (H1 – H3) فقط يتم ضرب القيمة المُقاسة بـ(1.5).



الشكل رقم (3-2-5)

11.4 في حال أردنا تطبيق الفحص بإستخدام طريقة الـ(HV Assist) أو كما تُسمى بطريقة الـ(Dual Windings) يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (3-2-6) والخاصة بمحول ذو مجموعة توصيل (Dyn5) كمثال، حيث يبين الشكل قياس مقاومة الملف (H1 – H3) و الملف (X1 – X0). (تم تلوين أسلاك التوصيل الخاصة بقياس الفولتية في الشكل التالي بالأزرق

والأخضر لتميزهما عن أسلاك حقن التيار ولتسهيل فهم التوصيلة، أما في الوقع فإن الأسلاك تكون ذات لون أسود وأحمر)



الشكل رقم (3-2-6)

12. تشغيل جهاز الفحص عن طريق مفتاح التشغيل (ON) رقم (3)، و التأكد من إنارة لمبة الإشارة التي تفيد الجاهزية (READY Indicator Lamp) رقم (4) الظاهرة في الشكل (3-2-2).
13. الضغط مطولاً على مفتاح بدء الفحص/التفريغ رقم (11) لأعلى أي على وضعية بدء الفحص (Initiate) والإستمرار بالضغط حتى تنير لمبة الإشارة التحذيرية التي تفيد بحقن التيار (ON Warning Indicator Lamp) رقم (12) وبعد ذلك نتوقف عن الضغط.
14. ستظهر قيمة التيار كنسبة مئوية (%) على شاشة العرض (A) رقم (13) و بعد إستقرار هذه القيمة ستظهر قيمة مقاومة الملفات على شاشة العرض (B) رقم (14) الظاهرة في الشكل (3-2-2).



ملحوظة: أما في حال إستخدام طريقة الفحص الموضحة بالشكل (3-2-6) أو كما تُسمى بطريقة الـ(Dual winding) فإن نتيجة الفحص ستظهر على شاشتي العرض (A & B) لكل من الملفين تحت الفحص.



ملحوظة: للمحولات الصغيرة عادة ما يكون الزمن اللازم لثبات التيار بالثواني وللمحولات الكبيرة بالدقائق وللملفات الموصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) أكثر قليلاً نظراً للتيارات الدوّارة كما ورد في كُتيّب التعليمات الخاص بهذا الجهاز [MEGGER, Manual AVTM830280 Rev.C].

15. بعد ثبات قيمة المقاومة الظاهرة على شاشة العرض (B) رقم (14)، يُمكن تغير وضعية مفتاح إختيار المدى رقم (5)(B) وذلك للتحكم بنطاق القراءات (Range) الظاهرة على الشاشة.

مثال: اذا أردت القيام بقياس مقاومة محول وكنت على علم مسبق (من الفحوصات الموقعيّة أو المصنعيّة) أن قيمة المقاومة حوالي الـ(**1.3 mΩ**) فإنه بهذه الحالة يتم ضبط التيار على (**50 mA**) أو أكثر و نطاق القراءات الـ(**Range**) على (**2 mΩ**) كما هو مبين بالشكل السابق.

16. بعد الإنتهاء من الفحص يتم الضغط مطولاً على مفتاح بدء الفحص/التفريغ رقم (**11**) لأسفل أي على وضعية التفريغ (**Discharge**) لإيقاف الفحص والبدء بالتفريغ، بحيث يتم الإستمرار بالضغط حتى تنطفئ لمبة الإشارة التحذيرية التي تفيد بحقن التيار (**ON Warning Indicator Lamp**) رقم (**12**) الظاهرة في الشكل (**2-2-3**) وبعد ذلك نتوقف عن الضغط.
17. نقوم بتكرار هذا الفحص على جميع الأطوار لملفات الجهد المرتفع والمنخفض.



ملحوظة: في حال تم فحص محول ذو مُغيّر خطوة (**Tap-changer**)، يجب إيقاف حقن التيار قبل تغيير وضعيته والإنتقال من خطوة لأخرى.



تحذير: بعد الإنتهاء من الفحص وتفريغ الطاقة المختزنة بالملفات قم بإزالة أسلاك التوصيل عن أطراف المحول قبل إزالتها عن جهاز الفحص.

الملحق (3-3)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط ، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة ملفات المحول بإستخدام جهاز Transformer Ohmmeter MTO210 by MEGGER



الشكل رقم (3-3-1)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(**MEGGER MTO210 Data sheet**)
  - قدرة المدخل : **120/240 V, 50/60 Hz, 720 VA**
  - نطاق تيار المخرج : **10 mA, 100 mA, 1 A, 10 A (dc)**
  - آلية تزويد التيار : توليد وتحكم إلكتروني.
  - فولتية فحص (**OC**) : **40 V (dc)**
  - فولتية القياسات : **Up to 20 V (dc)**
  - مدخل قياس المقاومة : مدخلين منفصلين لقياس المقاومة في نفس الوقت.
  - الحماية : إغلاق تلقائي في حال حدوث أي قطع في أسلاك التوصيل أو فقدان لقدرة المدخل الخاصة بجهاز الفحص، وعمل تفريغ (**Discharge**) للطاقة المختزنة في المعدة تحت الفحص. بالإضافة لوجود خاصية إزالة المغنطة (**De-magnetization**) بعد الإنتهاء من الفحص.

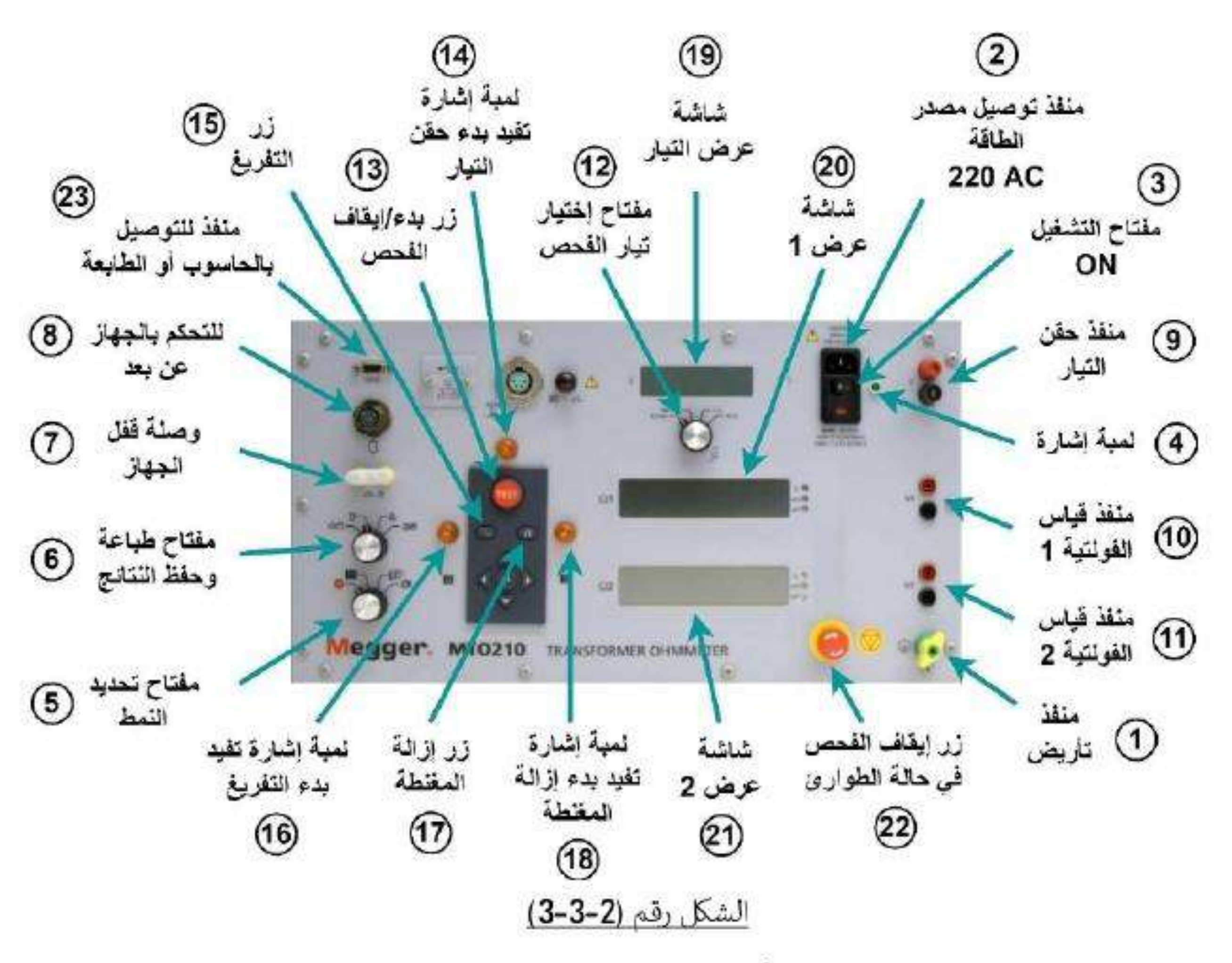
- الحماية من إرتفاع الحرارة : إغلاق تلقائي مع وجود لمبة إشارة تحذيرية عند تخطي حدود الحرارة المسموح بها لحماية جهاز الفحص.
- نطاق المقاومات المُقاسة : حسب الجدول التالي.

0.000001	10 µΩ to 0.2Ω	10 A
0.0001	0.2 Ω to 2 Ω	10 A
0.00001	100 µΩ to 2 Ω	1 A
0.001	2 Ω to 20 Ω	1 A
0.0001	1 mΩ to 20 Ω	100 mA
0.01	20 Ω to 200 Ω	100 mA
0.001	10 mΩ to 200 Ω	10 mA
0.1	200 Ω to 2000 Ω	10 mA

- الدقة : **± 0.1% Typical, ± 0.25% Guaranteed**
- البيئة التشغيلية المحيطة : **14° F to 122° F (-10° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing**
- البيئة التخزينية المحيطة : **-40 to 158° F (-40 to +70°C)**
- أبعاد الجهاز : **216 H x 546 W x 330 D mm**
- وزن الجهاز : **Net 29 lb. (13.1 kg)**

- **خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:**

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**6.1** إلى **6.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة الملفات.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء الواجهة الرئيسية للجهاز من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالشكل (**2-3-3**).

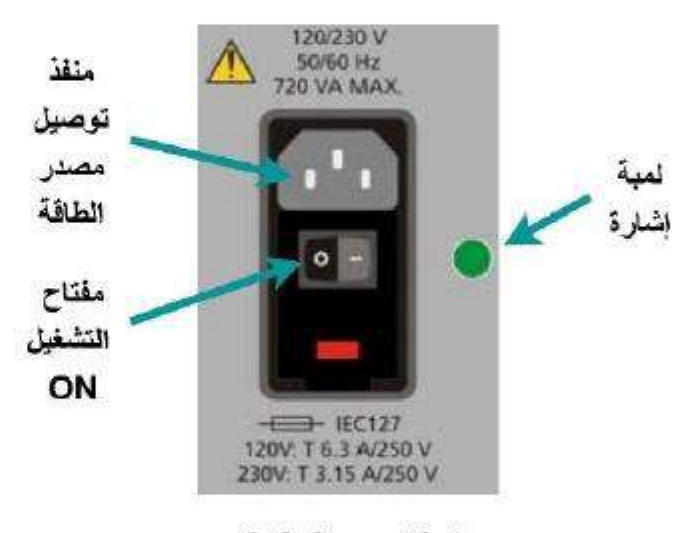


الشكل رقم (2-3-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
   - **7.1** التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
   - **7.2** التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
   - **7.3** التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
   - **7.4** التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
   - **7.5** وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خَطِر.
8. إحضار جهاز الفحص (**MTO210**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**50°**) درجة مئوية.
9. وصل جهاز الفحص بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض (**Wing Nut**) رقم (**1**) في الشكل السابق بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنّعة (**4.5m**) متر.
10. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (**Low Impedance**).
11. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمعاوقة (**Impedance**) تقلّ عن (**100mohms**) ملي أوم.
12. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ (**2**) المبين في الشكل (**2-3-3**).

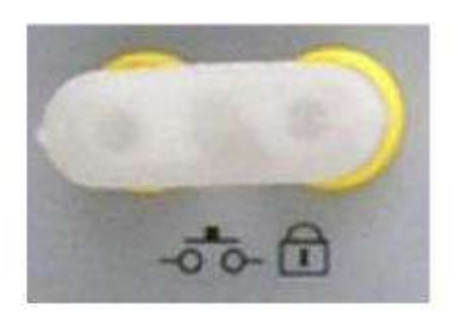
13. التأكد من وضعية المفاتيح كالآتي:

13.1 مفتاح التشغيل رقم **(3)** في الشكل **(2-3-3)** على وضعية **(O - OFF)** كما هو موضح في الشكل **(3-3-3)**.



الشكل رقم **(3-3-3)**

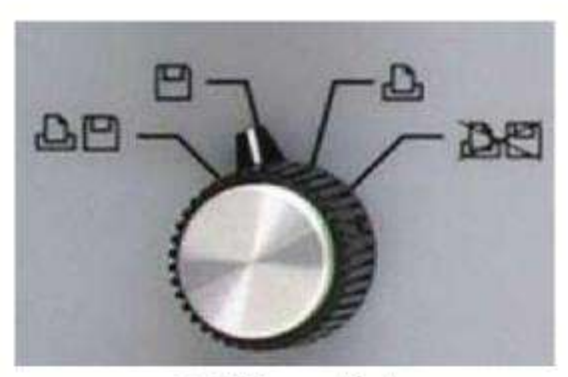
13.2 وصلة قفل الجهاز رقم **(7)** في الشكل **(2-3-3)** يجب أن تكون مُغلقة بواسطة **(Jumper)** كما هو مبين في الشكل **(4-3-3)** في حال عدم إستخدام إي إشارة خارجية لإيقاف الفحص أو منع تشغيله، وفي حال فتح هذه الوصلة يظهر على شاشة العرض **1** كلمة **(IntLoc)** والتي تفيد بقفل جهاز الفحص.



الشكل رقم **(4-3-3)**

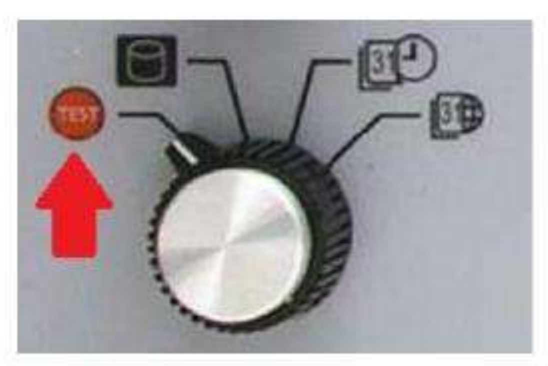
13.3 مفتاح طباعة وحفظ النتائج رقم **(6)** في الشكل **(2-3-3)** نقوم بإختيار واحدة من الوضعيات التالية والمبينة في الشكل **(5-3-3)**:

- ✓ وضعية طباعة وحفظ نتائج الفحص **(Print and Save Data)**.
- ✓ وضعية حفظ النتائج فقط **(Save Data)**.
- ✓ وضعية طباعة النتائج فقط **(Print Data)**.
- ✓ وضعية عرض النتائج على الشاشة فقط **(Just Display Data)**.



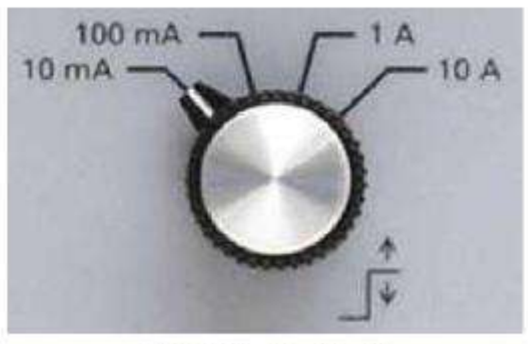
الشكل رقم (3-3-5)

13.4 مفتاح تحديد النمط رقم (**5**) في الشكل (**3-3-2**)، نقوم بإختيار وضعية الفحص (**Test Mode**) المُشار إليها في الشكل (**3-3-6**).



الشكل رقم (3-3-6)

13.5 مفتاح إختيار التيار رقم (**12**) في الشكل (**3-3-2**)، يتم من خلاله تحديد قيمة تيار الفحص المُراد حقنه (**10mA, 100mA, 1A, 10A**) وفقاً لقيمة مقاومة الملفات المُراد قياسها وقيمة التيار الإسمي لهذه الملفات كما هو مبين في الشكل (**3-3-7**).



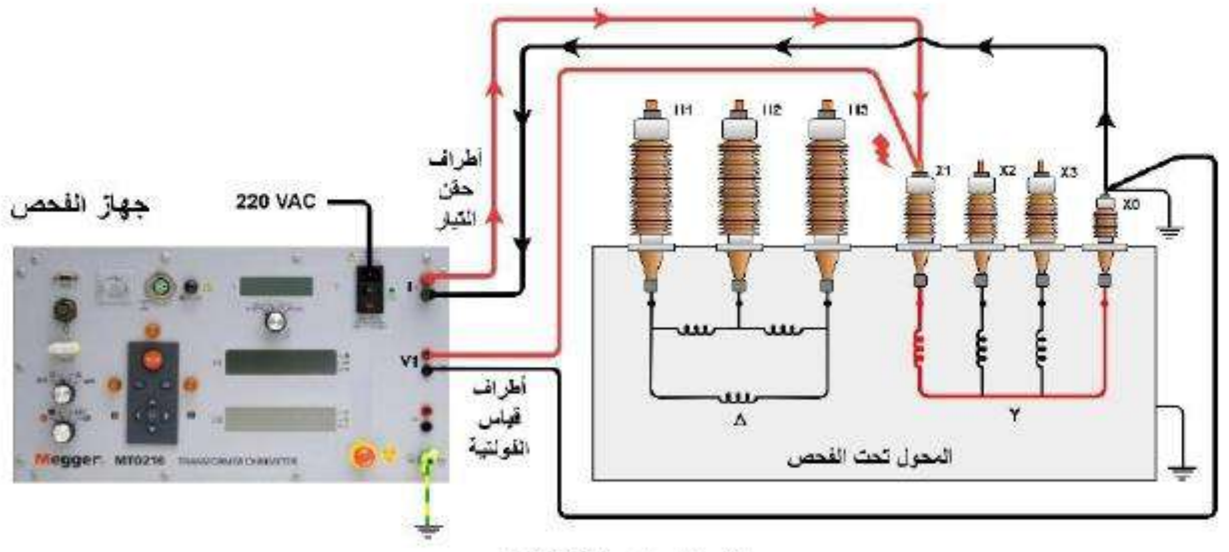
الشكل رقم (3-3-7)

14. وصل زوج الأسلاك الخاص بحقن التيار على المنفذ رقم (**9**) في الشكل (**3-3-2**). (على جهاز الفحص فقط، لا على المحول)

15. وصل زوج الأسلاك الخاص بقياس الفولتية على المنفذ رقم (**10**) في الشكل (**3-3-2**). (على جهاز الفحص فقط، لا على المحول)

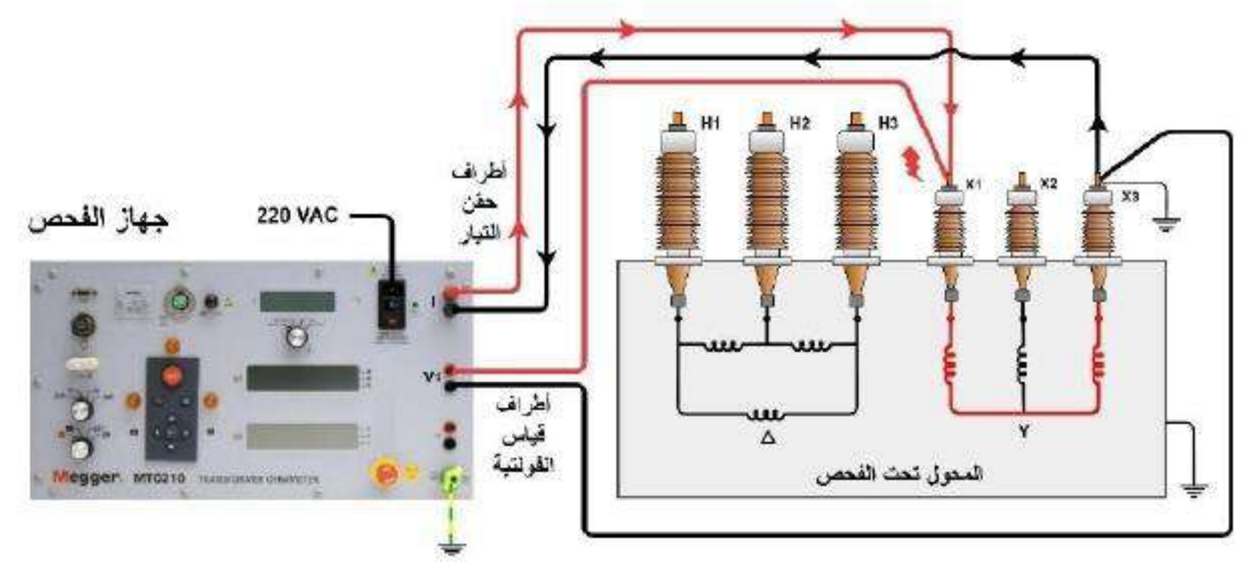
16. عمل توصيلة الفحص (توصيل الأسلاك بالمحول) وفقاً لنوع الملفات المُراد فحصها كالآتي:

16.1 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل نجمة (**Star - Y**) مع إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (**Accessible Neutral Point**)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (**3-3-8**) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملف (**X1 - X0**).



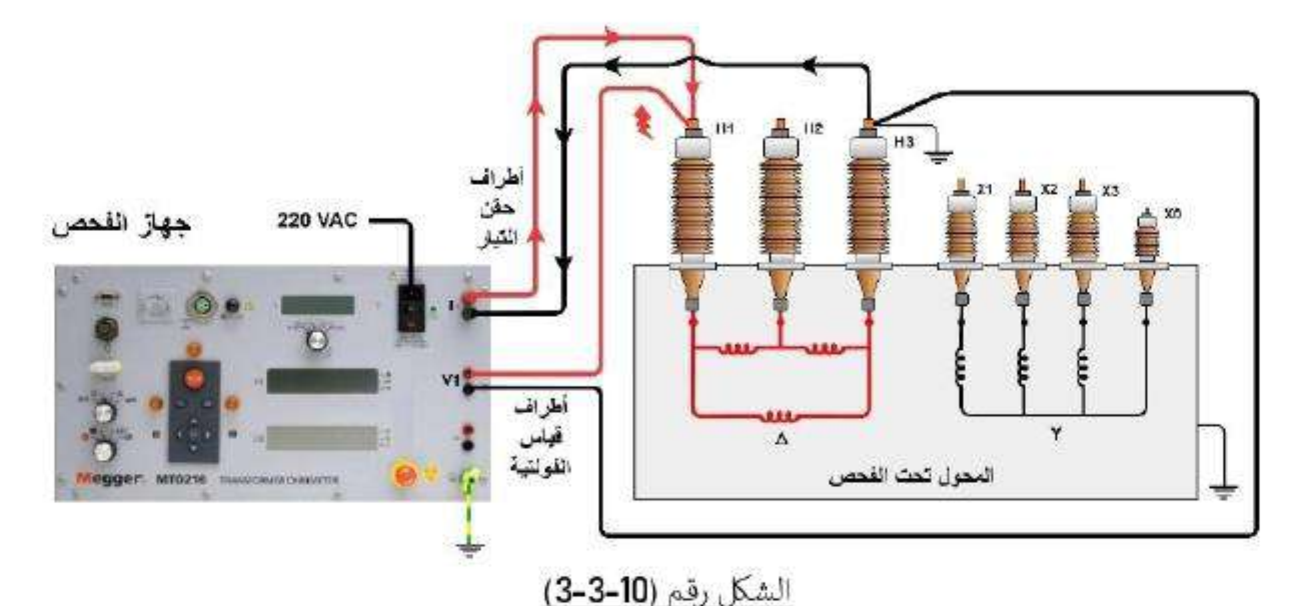
الشكل رقم (3-3-8)

16.2 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل نجمة (**Star - Y**) مع عدم إمكانية الوصول إلى نقطة التعادل (**Not Accessible Neutral Point**)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (**3-3-9**) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس مقاومة الملفين (**X1 - X3**)، وللحصول على قيمة مقاومة الملف (**X1 - X0**) يتم قسمة القيمة المُقاسة على (**2**) وكذلك الحال للحصول على مقاومة الملف (**X3 - X0**).



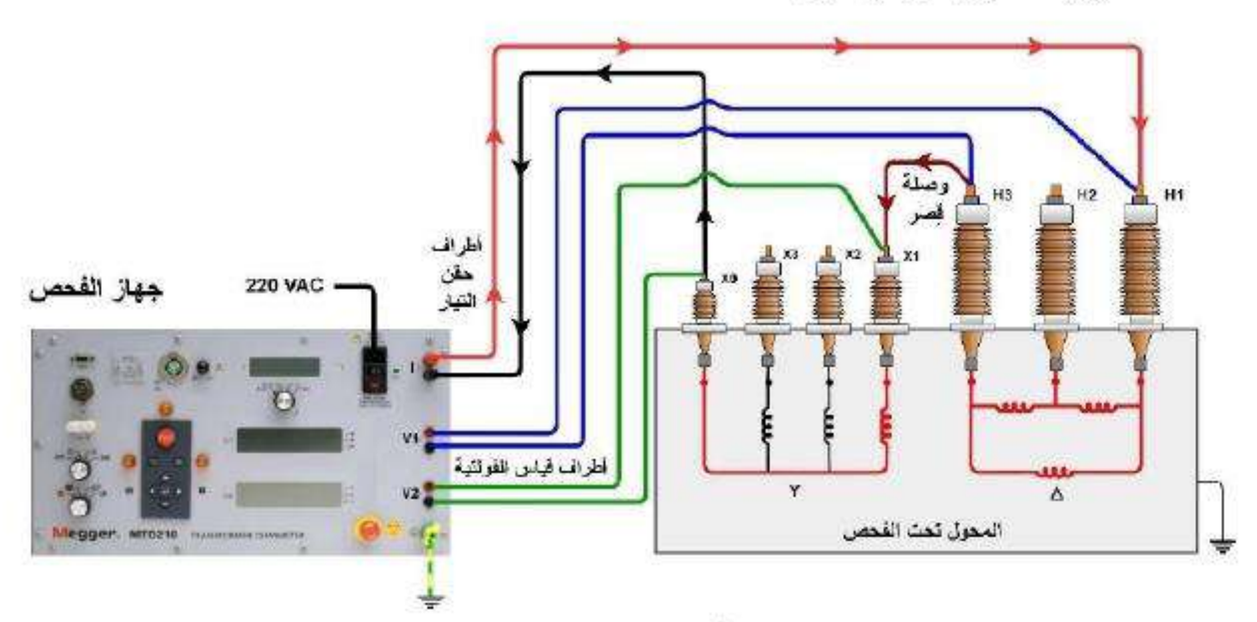
الشكل رقم (3-3-9)

16.3 في حال كانت ملفات المحول المُراد فحصها موصولة على شكل مثلث(**Delta - Δ**)، يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (**3-3-10**) والتي تبين التوصيلة الخاصة بقياس المقاومة المُركّبة لتوصيلة المثلث (**H1H3//(H1H2+H2H3**)، وللحصول على قيمة مقاومة الملف (**H1 – H3**) فقط يتم ضرب القيمة المُقاسة بـ(**1.5**).



الشكل رقم (**3-3-10**)

16.4 في حال أردنا تطبيق الفحص بإستخدام طريقة الـ(**HV Assist**) أو كما تُسمى بطريقة الـ(**Dual Windings**) يُمكن تطبيق التوصيلة الموضحة في الشكل (**3-3-11**) والخاصة بمحول ذو مجموعة توصيل (**Dyn5**) كمثال، حيث يبين الشكل قياس مقاومة الملف (**H1 – H3**) و الملف (**X1 – X0**). (تم تلوين أسلاك التوصيل الخاصة بقياس الفولتية في الشكل التالي بالأزرق والأخضر لتميزهما عن أسلاك حقن التيار ولتسهيل فهم التوصيلة، أما في الوقع فإن الأسلاك تكون ذات لون أسود وأحمر)



الشكل رقم (**3-3-11**)

17. تشغيل جهاز الفحص عن طريق مفتاح التشغيل (**ON**) رقم (**3**) والمدمج مع منفذ توصيل مصدر الفولتية في الـ(**AC input power module**)، و التأكد من إنارة لمبة الإشارة خضراء اللون رقم (**4**) في الشكل (**2-3-3**) التي تفيد الجاهزية.
18. التأكد من عدم وجود أية مشاكل في جهاز الفحص نفسه، فبعد التشغيل يقوم جهاز الفحص بعمل فحص ذاتي (**Self-test**) وإظهار رسائل تفيد بوجود مشاكل في الجهاز إن وجدت.
19. ملاحظة ظهور كلمة (**READY**) على شاشة عرض التيار رقم (**19**) و ظهور درجة حرارة الجو عند الفحص على شاشة العرض 1 رقم (**20**) بحيث يُمكن تغيير قيمة هذه الحرارة بإستخدام الأسهم لأعلى و أسفل.
20. الضغط على زر بدء الفحص رقم (**13**) و بعدها ستُنير لمبة الإشارة التحذيرية رقم (**14**) والتي تفيد بدأ حقن التيار، في هذه الأثناء ستظهر قيمة التيار المحقون في الملفات على شاشة عرض التيار رقم (**19**) ويظهر عداد الثواني على شاشة العرض 1 رقم (**20**) و بعد ثبات التيار يختفي عداد الثواني وتظهر قيمة مقاومة الملفات.
21. يُمكن الضغط على زر بدأ الفحص رقم (**13**) لإيقاف حقن التيار و بدء التفريغ أو يُمكن إيقاف الفحص وبدأ التفريغ بالضغط على زر التفريغ رقم (**15**) مباشرة حيث ستنير لمبة الإشارة رقم (**16**) بشكل متقطع لتفيد بأن عملية التفريغ قيد العمل ومن ثم تنطفأ بشكل كامل عند إنتهاء التفريغ.
22. بعد الإنتهاء من عملية التفريغ يُمكن نقل أسلاك التوصيل بحذر للملفات الأخرى المُراد قياس مقاومتها.
23. نقوم بتكرار هذا الفحص على جميع الأطوار لملفات الجهد المرتفع والمنخفض.
24. بعد الإنتهاء من الفحص بشكل نهائي أي على جميع الملفات والأطوار يُمكن عمل إزالة لمغنطة القلب الحديدي (**Core De-magnetization**) عبر الضغط على زر إزالة المغنطة رقم (**17**) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة رقم (**18**) لحين إنتها إزالة المغنطة.



ملحوظة: للمحولات الصغيرة عادة ما يكون الزمن اللازم لثبات التيار بالثواني وللمحولات الكبيرة بالدقائق وللملفات الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**) أكثر قليلاً نظراً للتيارات الدوّارة كما ورد في كُتيب التعليمات الخاص بهذا الجهاز **[MEGGER, AVTM830280 Rev.C]**.



ملحوظة: في حال تم فحص محول ذو مُغيّر خطوة (**Tap-changer**)، يجب إيقاف حقن التيار قبل تغيير وضعيته والإنتقال من خطوة لأخرى.



تحذير: في حال أردت إيقاف الفحص لأسباب طارئة يُمكن الضغط على زر إيقاف الفحص في حالة الطوارئ (**Emergency Push button**) رقم (**22**) في الشكل (**2-3-3**) لإيقاف الفحص وبدء عملية التفريغ تلقائياً.

الملحق (3-4)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مقاومة ملفات المحول بإستخدام جهاز
TESTRANO 600 by OMICRON



الشكل رقم (3-4-1)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(TESTRANO600 Brochure)
  - فولتية المدخل الإسمية : **100/240 V, 50/60 Hz**
  - فولتية المدخل المسموح بها : **85-264 V, 45-65 Hz**
  - نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

عدد الأطوار	نطاق التيار (dc)	الفولتية القصوى (dc)
ثلاثي الأطوار	0 ... ±33 A	56 V
	0 ... ±16 A	113 V
آحادي الطور	0 ... ±100 A	56 V
	0 ... ±33 A	170 V
	0 ... ±50 A	113 V
	0 ... ±16 A	340 V

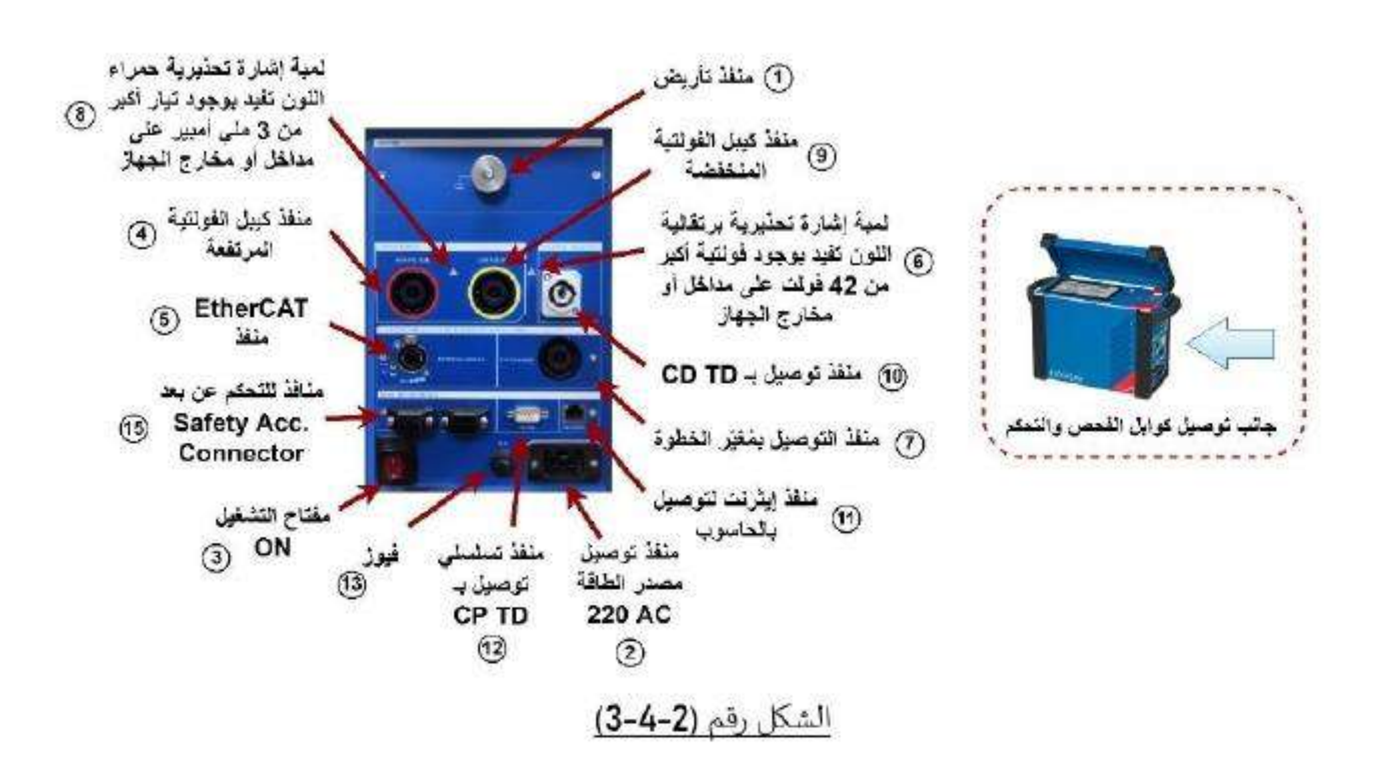
- نطاق المقاومات المُقاسة : حسب الجدول التالي.

التيار (dc)	نطاق المقاومة	دقة القراءات
3 A	10 ... 100 Ω	0.1%
	1 ... 10 Ω	0.1%
	0.1 ... 1 Ω	0.1%
30 A	1 ... 10 Ω	0.037%
	0.1 ... 1 Ω	0.04%
	0.01 ... 0.1 Ω	0.033%
	0.001 ... 0.01 Ω	0.037%
	0.0001 ... 0.001 Ω	0.05%
100 A	3 ... 30 mΩ	0.033%
	300 ... 3000 µΩ	0.037%
	30 ... 300 µΩ	0.05%
	3 ... 30 µΩ	0.07%

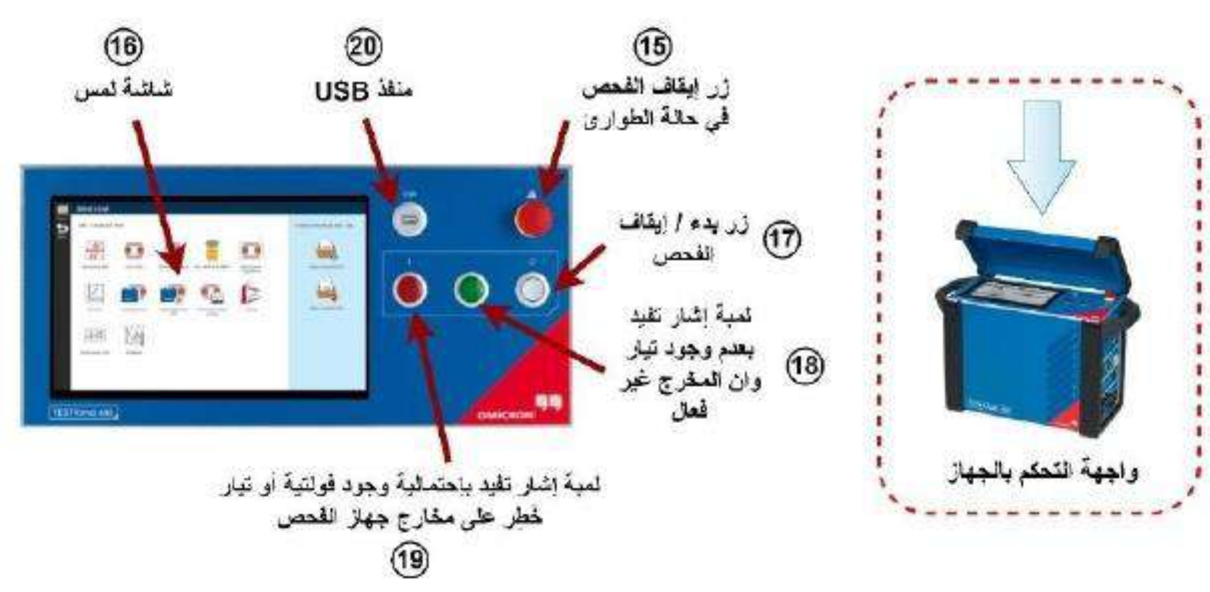
- البيئة التشغيلية المحيطة : 14° F to 131° F (-10° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
- أبعاد الجهاز : 580 x 386 x 229 mm
- وزن الجهاز : 45.5 lb. (20.6 kg), with display

- **خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:**

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**6.1** إلى **6.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مقاومة الملفات.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالأشكال (**3-4-2&3**).



الشكل رقم (3-4-2)



الشكل رقم (3-4-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
   - **7.1** التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
   - **7.2** التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
   - **7.3** التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
   - **7.4** التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
   - **7.5** وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خَطِر.
8. إحضار جهاز الفحص (**TESTRANO 600**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**55°**)

درجة مئوية، وفي حال كانت الحرارة أكثر من (**40°**) درجة مئوية يجب الرجوع للكتيب التفصيلي (**Manual**) الخاص بجهاز الفحص لمعرفة التيار الأقصى الذي يُمكن حقنه من خلال الجهاز، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.

9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (**3**) في الشكل (**3-4-2**) على وضعية (**OFF - O**) الموضحة على المفتاح.
10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (**Emergency Push Button**) رقم (**15**) في الشكل (**3-4-3**).
11. وصل جهاز الفحص بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض رقم (**1**) في الشكل (**3-4-2**) بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنّعة أو بواسطة كيبل تأريض لا يقل مساحة مقطعه العرضي عن ($6\,mm^2$) ملي متر مربع أقرب ما يُمكن على مُشغل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (**Impedance**) قدر المستطاع.
12. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (**Low Impedance**).
13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمعاوقة قليلة (**Low Impedance**).
14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (**2**) في الشكل (**3-4-2**).
15. تشغيل الجهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم (**3**) في الشكل (**3-4-2**) عن طريق تغير وضعيته من (**O**) لـ(**I**) الموضحة على المفتاح.
16. ملاحظة إنارة كل من لمبة الإشارة خضراء اللون رقم (**18**) والحلقة الزرقاء حول زر بدء/إيقاف الفحص (**Start/Stop**) في الشكل (**3-4-3**) وهذا يعني أن الجهاز لا يحقن تيار ولا فولتية كما يظهر في الشكل (**3-4-4**).



الشكل رقم (**3-4-4**)

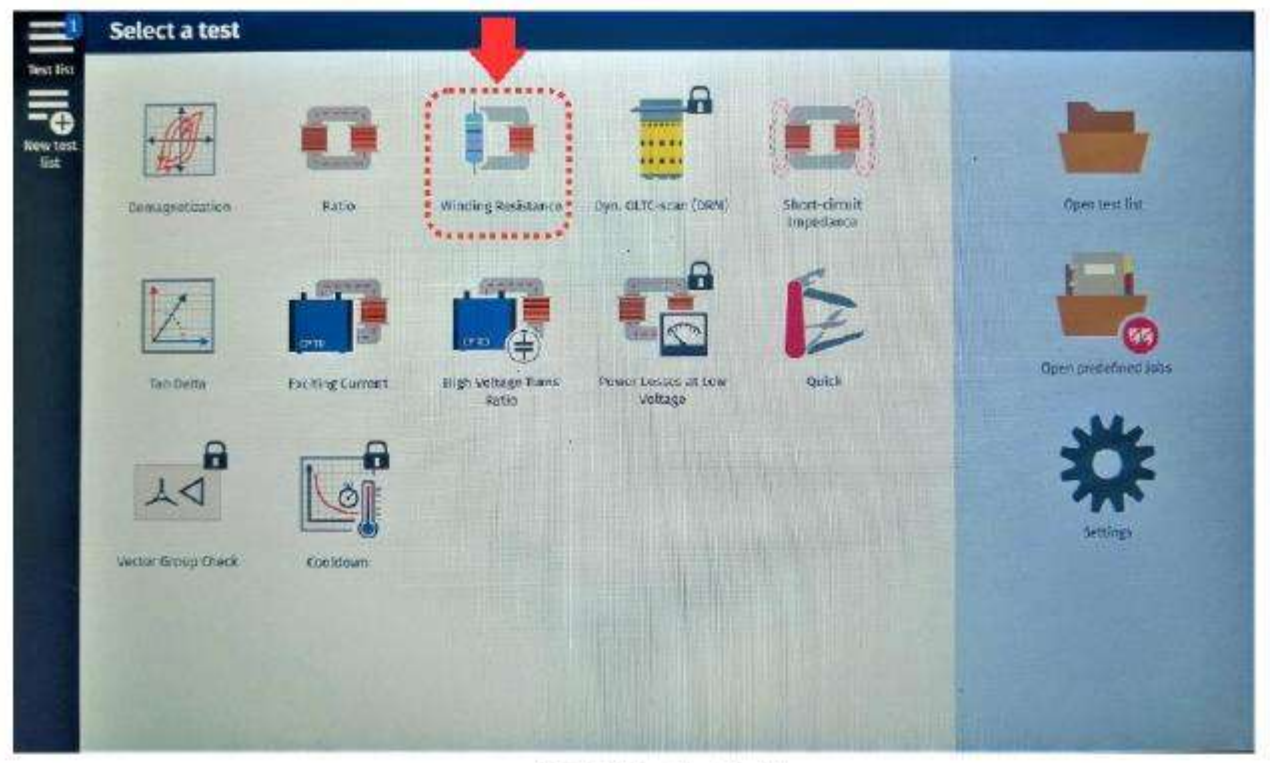
17. في حال كان هنالك مشكلة ما في التأريض سوف تظهر رسالة على الشاشة تفيد بذلك وستظهر العلامة التالية أسفل الشاشة ، وفي حال عدم إنارة أي ضوء تحذيري أو ظهور أية رسائل

تحذيرية على الشاشة فإن ذلك يعني أن الأرضي والجهاز سليمين والجهاز مُهيأ لعمل باقي التوصيلات و البدء بالفحص.



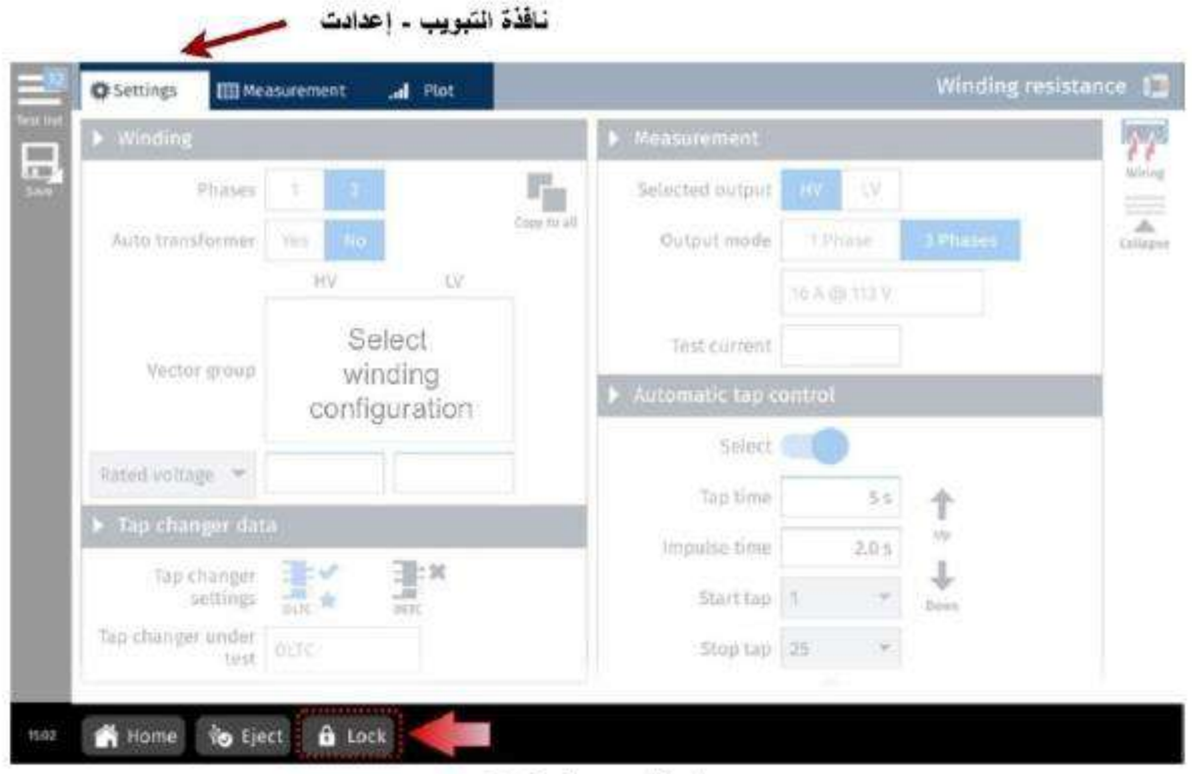
ملحوظة: يُتيح جهاز الفحص (**TESTRANO 600**) إمكانية ضبط إعدادات الفحص و إجراؤه بطريقتين، الطريقة الأولى بواسطة شاشة اللمس (**Touch Control**) مباشرة والطريقة الثانية بواسطة توصيل جهاز الحاسوب بجهاز الفحص (**TESTRANO 600**) والقيام بالفحص عبر برنامج (**Primary Test Manger - PTM**). حيث سيتم التطرُق للطريقة الأولى فقط في هذا الملحق.

18. إختيار فحص مقاومة الملفات (**Winding Resistance**) من القائمة الرئيسية الظاهرة على شاشة اللمس (**Touch Control**) والمُبينة في الشكل (**3-4-5**).



الشكل رقم (3-4-5)

19. بعد ذلك تظهر الشاشة المُبينة في الشكل (**3-4-6**) وتكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (**Settings**). نقوم بعمل قفل (**Software Lock**) للحفاظ على الوضعية الآمنة أثناء عمل التوصيلة المناسبة للفحص، وذلك بالضغط على زر القفل الظاهر أسفل الشاشة 🔒 كما هو مُبين في الشكل (**3-4-6**).



الشكل رقم (3-4-6)

20. بعد الضغط على زر القفل (**Lock**) المبين في الشكل السابق تظهر النافذة الفرعية المبينة في الشكل (**3-4-7**)، ثم نقوم بإدخال كود رباعي والضغط على كلمة (**Lock**). وبذلك نكون قد وصلنا للوضعية الآمنة للجهاز.



الشكل رقم (3-4-7)

21. توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (**3-4-8**) بجهاز الفحص عبر المنافذ المبينة في الشكل (**3-4-2**) كالآتي:

21.1 توصيل كيبل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (**4**) المُبين في الشكل (**3-4-2**).

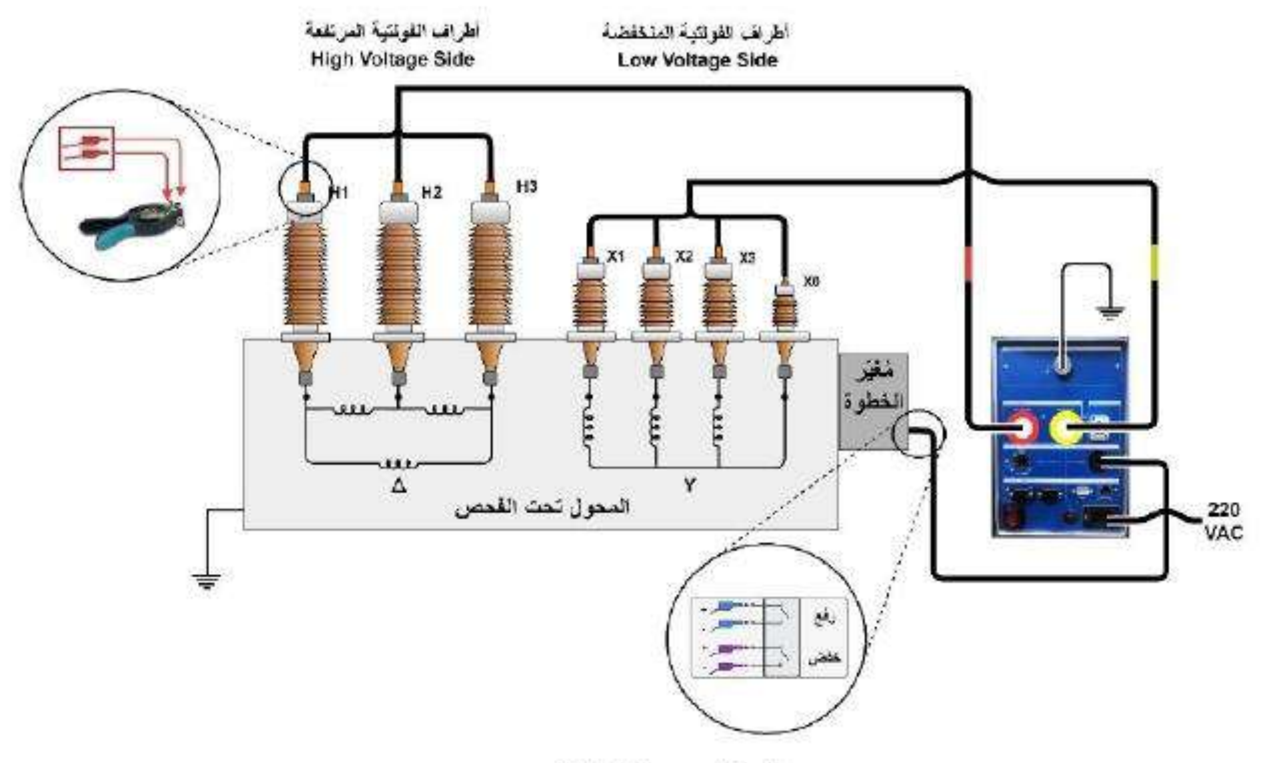
21.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة (الأصفر) بالمنفذ رقم (**9**) المُبين في الشكل (**3-4-2**).

21.3 توصيل كيبل مُغيّر الخطوة (الأسود) بالمنفذ رقم (**7**) المُبين في الشكل (**3-4-2**).



الشكل رقم (**3-4-8**)

22. توصيل كوابل جهاز الفحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المبينة بالشكل (**3-4-9**).



الشكل رقم (**3-4-9**)

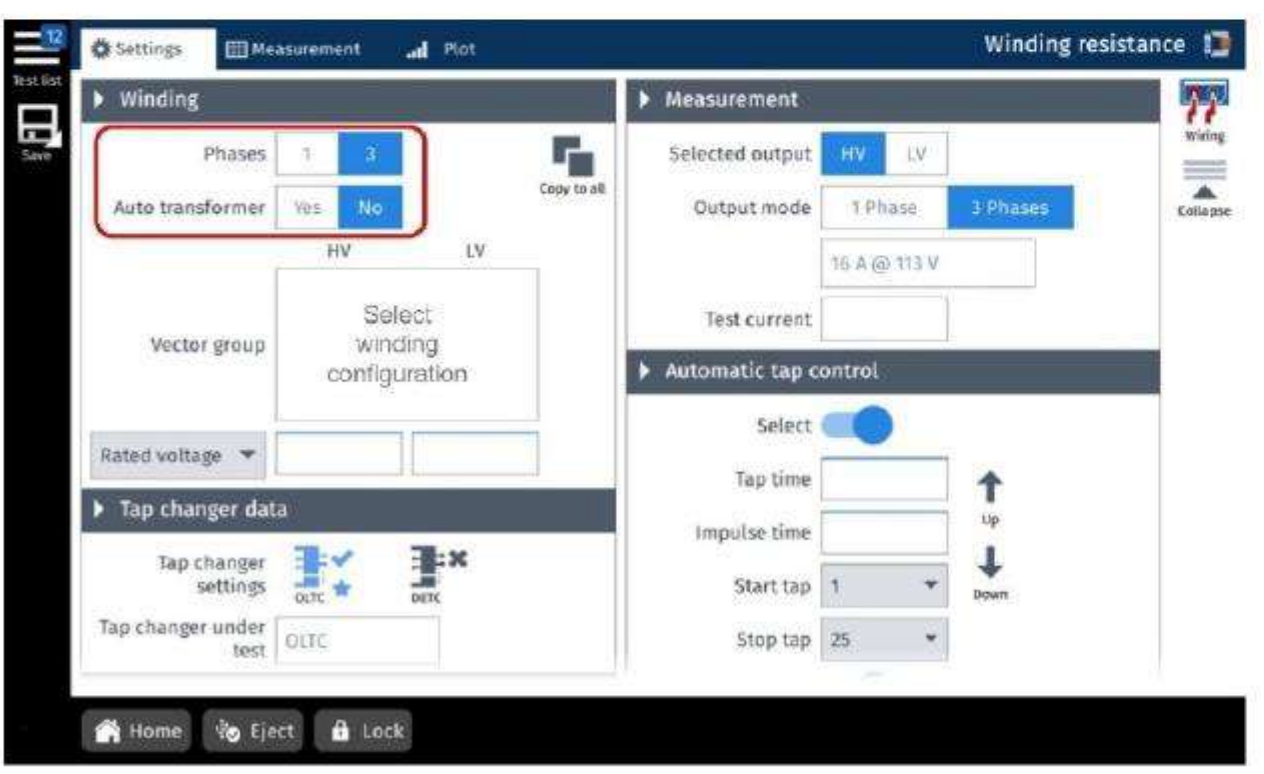
23. إرجاع الطاقة الكهربائية لمُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) فيما إذا كانت مفصولة.

24. التأكد من نصب حواجز السلامة بالإضافة للشواخص التحذيرية.

25. بعد الإنتهاء من التوصيلة كاملة، نقوم بتحرير (Release) زر إيقاف الفحص في حالة الطوارئ (Emergency Stop Button).

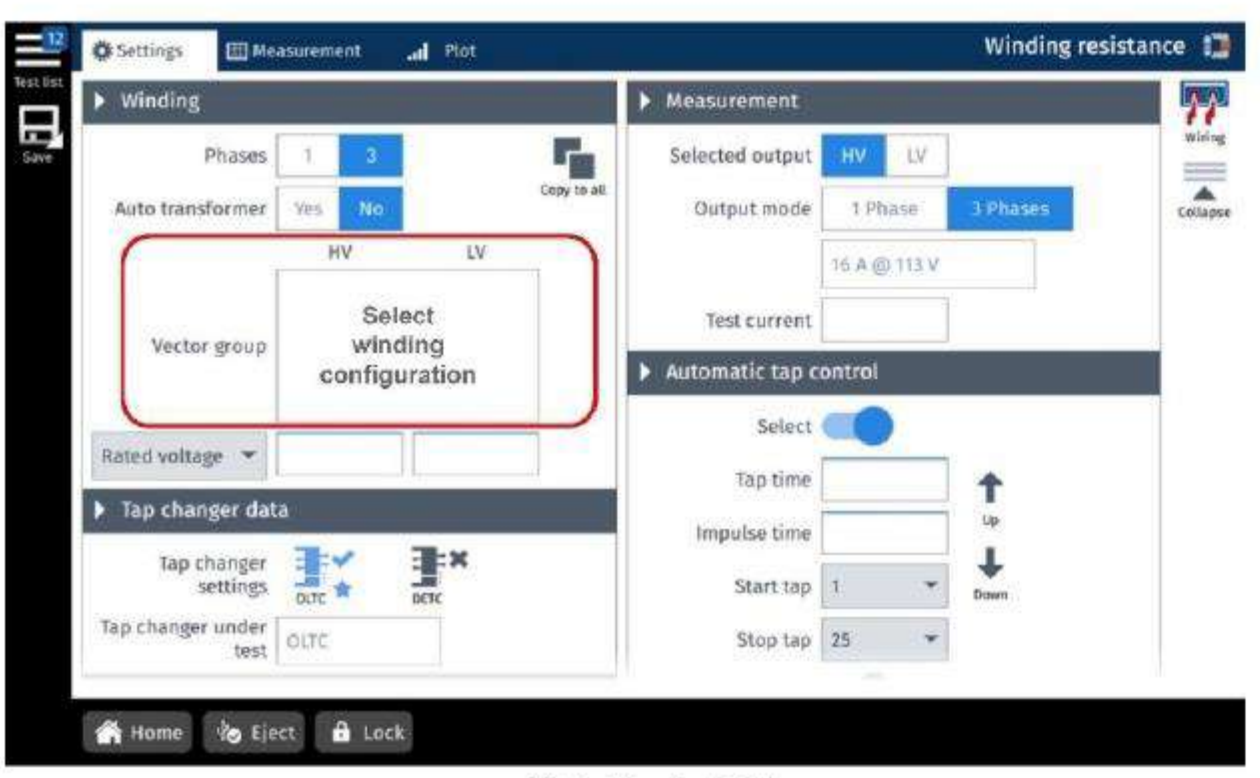
26. الرجوع لشاشة اللمس وإزالة قفل الشاشة عبر إدخال الكود الرباعي والضغط على أيقونة الإدخال ↵ و يُمكن كذلك إزالة قفل الشاشة عبر إطفاء الجهاز وتشغيله مرة أخرى.

27. من الشاشة الظاهرة في الشكل (3-4-10) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (Settings) يتم تحديد عدد أطوار المحول المُراد فحصه بالضغط على الرقم (3) أي أنه ثلاثي الطور (3 phase transformer)، ثم يتم الضغط على (No) بجانب المحول التلقائي (Auto Transformer).



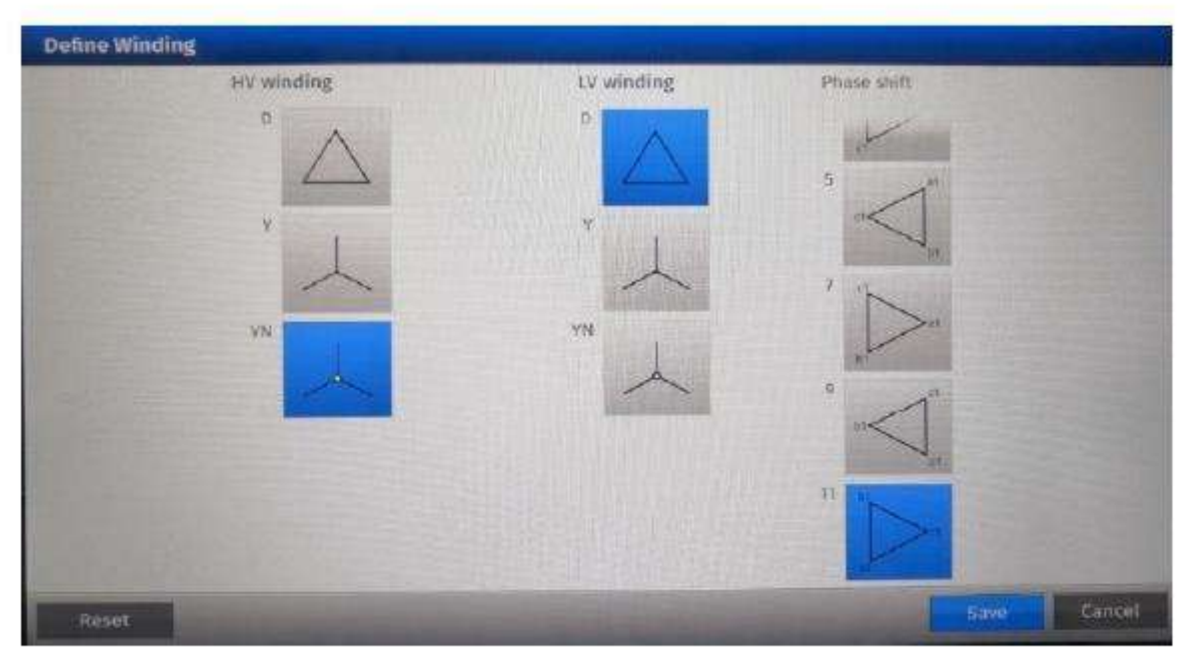
الشكل رقم (3-4-10)

28. تحديد مجموعة التوصيل (Vector group) الخاصة بالمحول المُراد فحصه وذلك بالضغط على جملة إختر مجموعة التوصيل (Select winding configuration) الظاهرة على الشاشة والمُبينة في الشكل (3-4-11) لتظهر لنا شاشة تحديد مجموعة التوصيل.



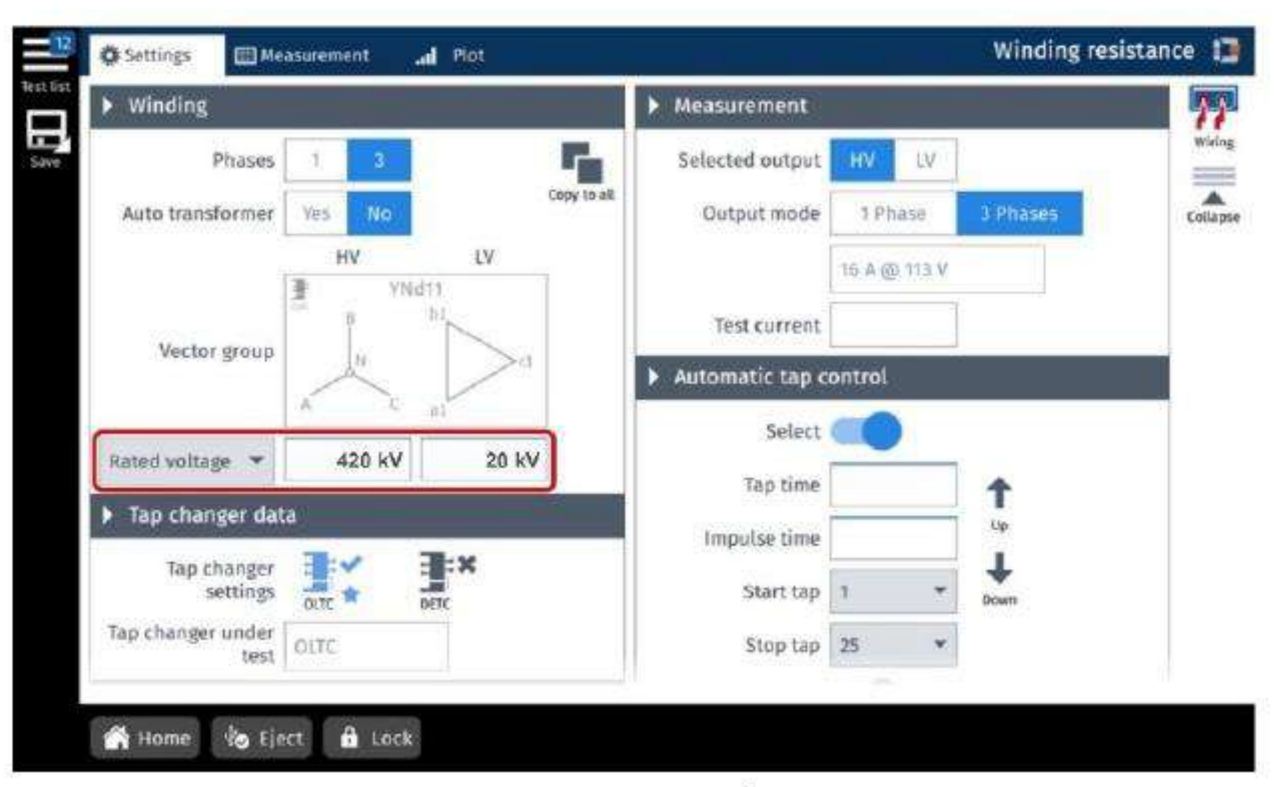
الشكل رقم (3-4-11)

29. من شاشة تحديد مجموعة التوصيل الظاهرة في الشكل (3-4-12) نقوم بتحديد مجموعة التوصيل الخاصة بالمحول المُراد فحصه، حيث تم تحديد المجموعة (YNd11) كمثال ثم الضغط على زر حفظ (Save).



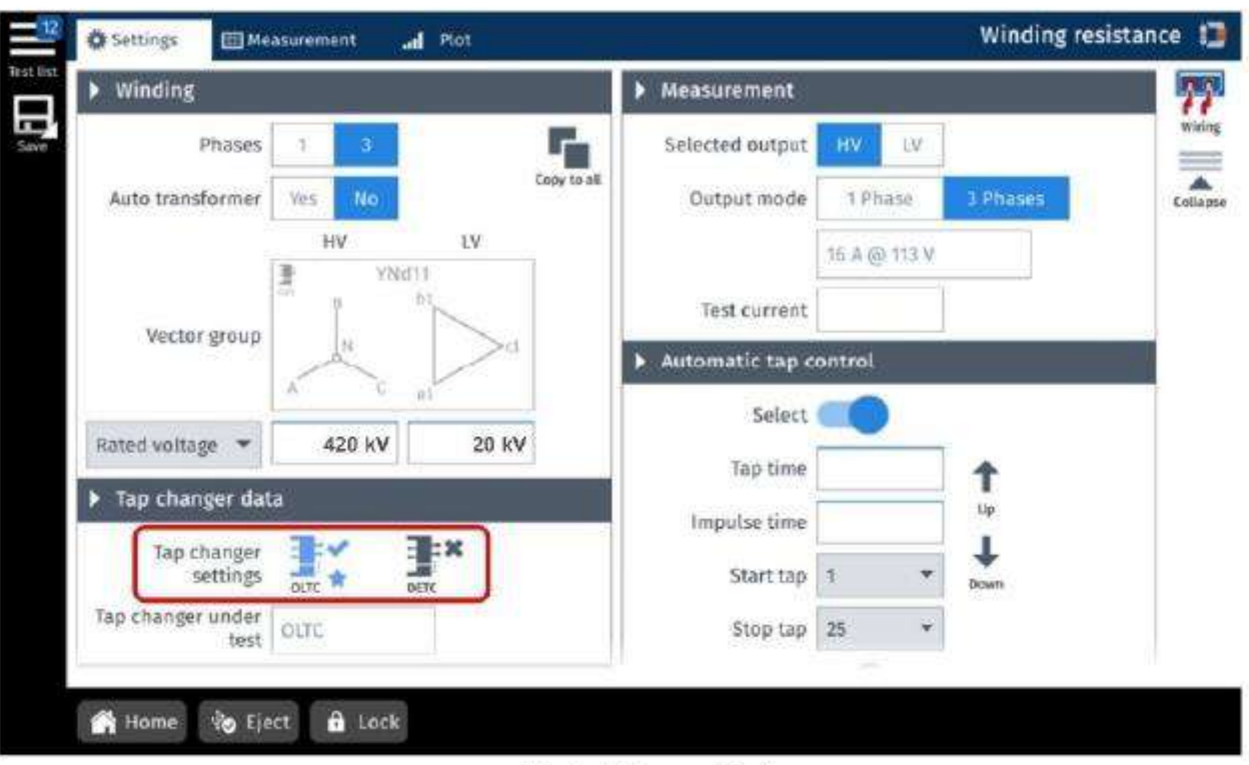
الشكل رقم (3-4-12)

30. تحديد الفولتية الإسمية للمحول المُراد فحصه وذلك بإدخال قيمة هذه الفولتية بالمكان المخصص لها كما هو مبين بالشكل (3-4-13).



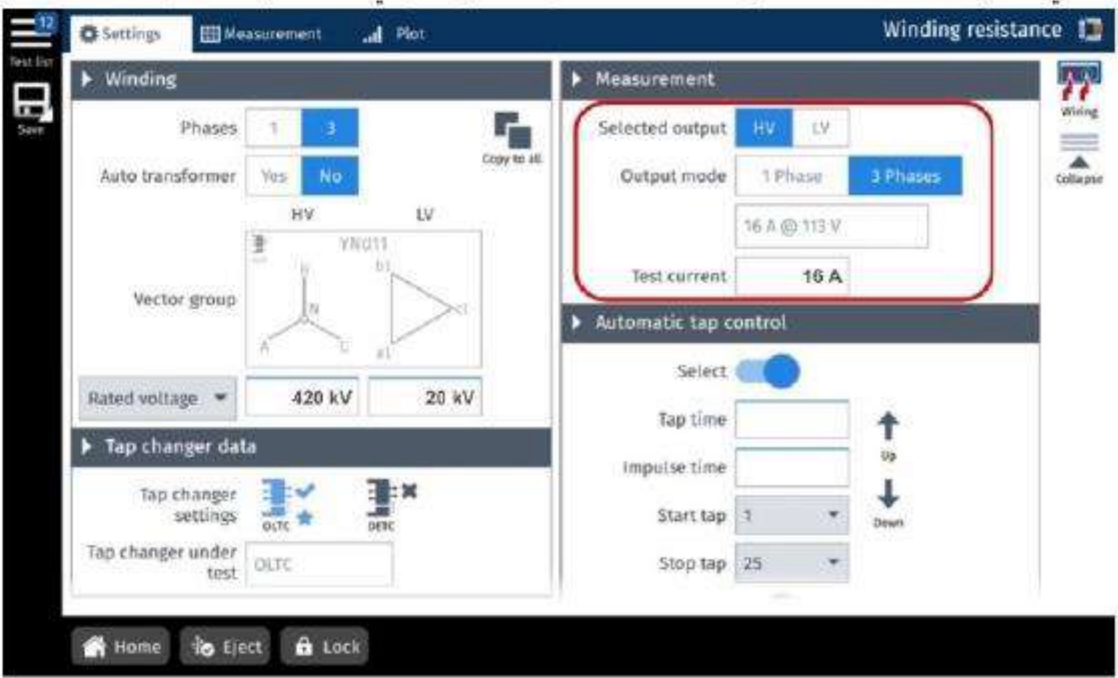
الشكل رقم (3-4-13)

31. تحديد نوع مُغيّر الخطوة (**Tap Changer**) فيما إذا كان (**OLTC** أو **DETC**)، وفي حالتنا هذه نقوم بإختيار (**OLTC**) وذلك بالضغط عليها كما هو مبين بالشكل (**3-4-14**).



الشكل رقم (3-4-14)

32. تحديد نمط المخرج (**Output mode**) بالضغط على (**3 phases**) وذلك لتفعيل الفحص بالنمط ثلاثي الطور، وكذلك تحديد فولتية وتيار الفحص كما هو مُبين في الشكل (**3-4-15**).



الشكل رقم (**3-4-15**)

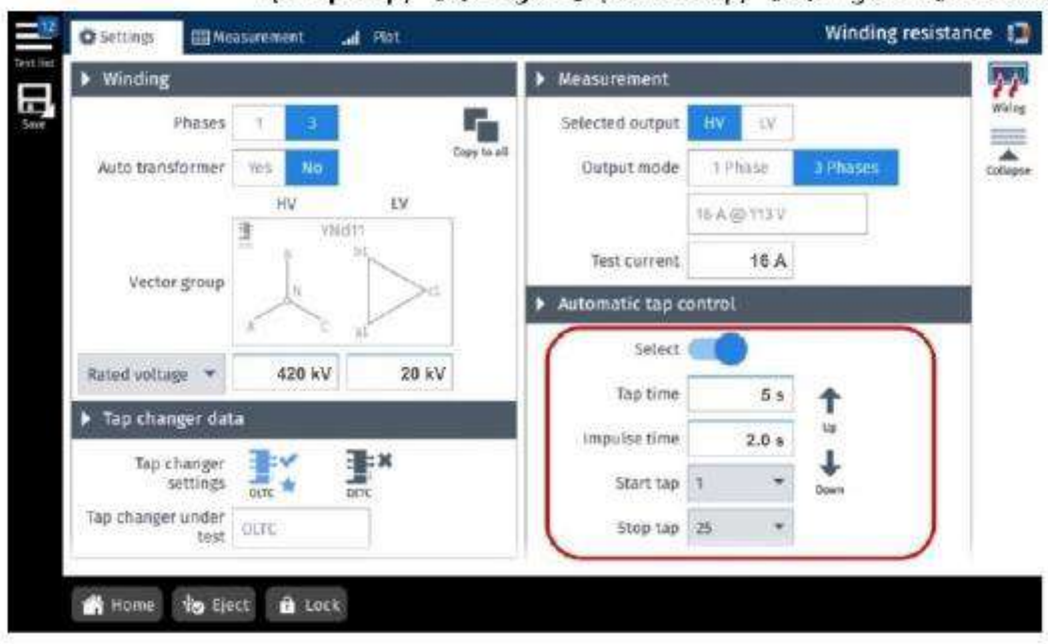
33. ضبط إعدادات مُغيّر الخطوة (**Tap Changer**) في حال تم إختيار (**OLTC**) كما هو مُبين في الشكل (**3-4-16**) ووفقاً للخطوات التالية:

33.1 تحديد وضع التغيير بين الخطوات (**Taps**) يدوي (**Manual**) أو تلقائي (**Automatic**).

33.2 تحديد زمن التغيير بين الخطوات (**Tap time**).

33.3 تحديد مدة إشارة التغيير بين الخطوات (**Impulse time**).

33.4 تحديد خطوة البداية (**Start Tap**) وخطوة النهاية (**Stop Tap**).



الشكل رقم (**3-4-16**)

34. لتصحيح قيمة المقاومة المُقاسة لقيمة الحرارة المرجعيّة يُمكن ضبط الإعدادات التالية في نفس النافذة الرئيسية بالأسفل لهذا الفحص كما هو مُبين بالشكل (**3-4-17**)، وذلك بإختيار (**ON**) لتفعيل التصحيح وإختيار المادة المُكونة للملفات وإدخال قيمة درجة حرارة الملفات عند الفحص ومن ثم إختيار قيمة درجة الحرارة المرجعيّة وفقاً لما تم شرحه مسبقاً في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة من فصل فحص مقاومة الملفات وعادة ما تكون (**75° C**) درجة مئوية.

Test conditions
on; Copper; 25.0 °C; 75.0 °C; 1.193
Temperature correction OFF ON
Material Copper
Temperature 25.0 °C
Reference temperature 75.0 °C
Correction factor 1.193

<u>الشكل رقم (**3-4-17**)</u>

35. كما ويُمكن تفعيل خاصية حفظ (تسجيل) قيمة المُقاومة المقاسة بشكل تلقائي عند الوصول لقيمة تفاوت يتم ضبطها مُسبقاً و الثبات عليها لفترة من الزمن يتم ضبطها أيضاً.

Automatic result
on; 0.010 %; 5 s
Automatic result OFF ON
Tolerance R dev 0.010 %
Settling time (Δt) 5 s

<u>الشكل رقم (**3-4-18**)</u>

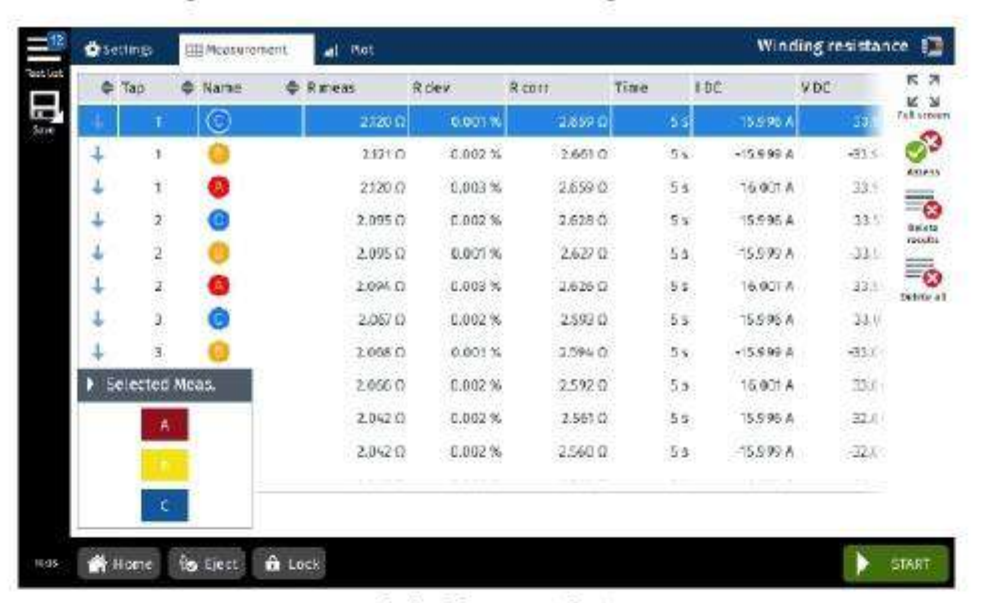
36. بالرجوع إلى لوحة التحكم باللمس (**Touch Control**) و الضغط على علامة التبويب قياسات (**Measurements**) المحاذية لنافذة التبويب إعدادات (**Settings**) لتظهر الشاشة المُبينة بالشكل (**3-4-19**) ثم نقوم بالضغط على زر إبدأ (**Start**) ثم التأكد من إنارة الحلقة الزرقاء حول زر (**Start/Stop**) وبذلك يكون الجهاز بوضعية الإستعداد للحقن.



الشكل رقم (3-4-19)

37. الضغط على زر إبدأ/توقف (Start/Stop) ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الضوء الأحمر و الحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) بالوميض بشكل متقطع.

38. بعد الإنتهاء من الفحص يومض الضوء الأخضر وبعدها يُمكن إيجاد النتائج في علامة التبويب قياسات (Measurements) كما هو مُبين بالشكل (3-4-20) وبذلك يكون قد إنتهى الفحص.



الشكل رقم (3-4-20)



تحذير: لا تَقُم بإزالة أسلاك الفحص إلا بعد التأكد من أن لمبة الإشارة التحذيرية الحمراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) ولمبات الإشار التحذيرية على الواجهة الجانبية لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) وكذلك لمبة الإشارة الخضراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُضيئة (ON).

الملحق (3-5)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص و توصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة الجهاز جيـــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

إزالة مغناطيسية القلب الحديدي للمحول بإستخدام جهاز TESTRANO 600 by OMICRON



الشكل رقم (3-5-1)

قبل البدء بالخطوات يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالشكل (3-5-2&3).

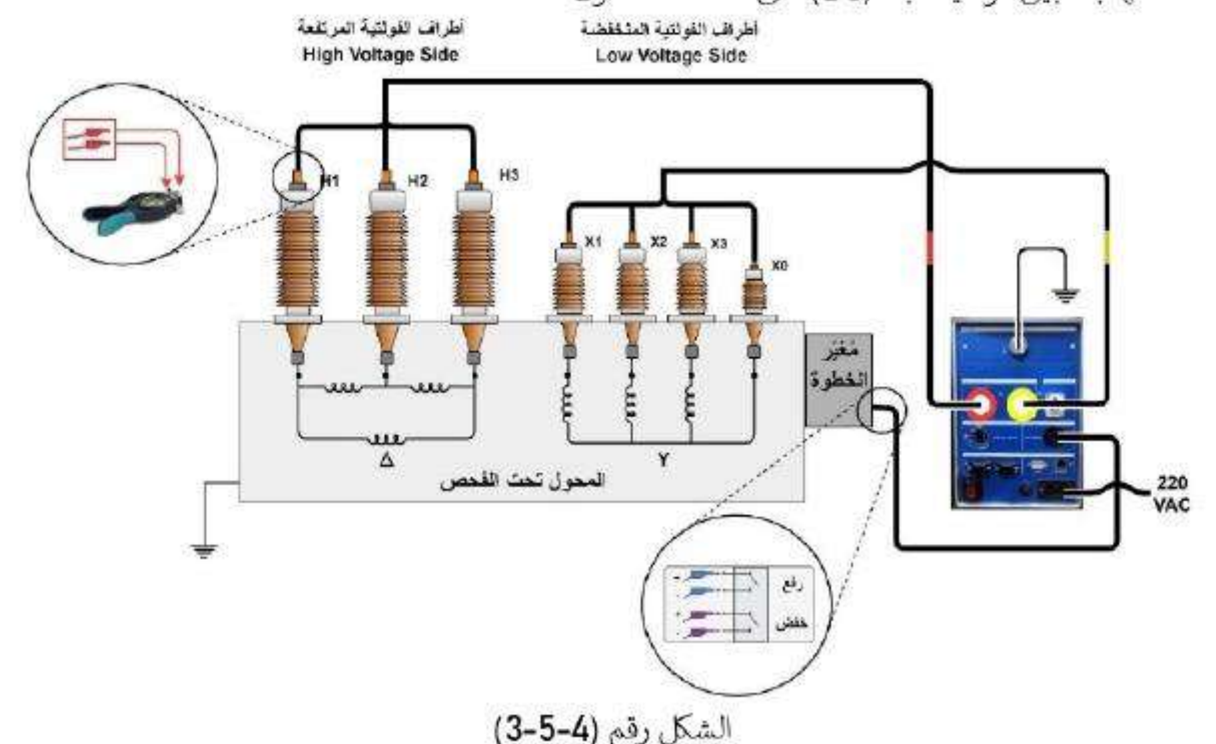


الشكل رقم (3-5-2)



الشكل رقم (3-5-3)

بعد الإنتهاء من إجراء فحص مقاومة الملفات (**WRM**) وبواسطة نفس التوصيلة المُبينة في الشكل (**3-5-4**) يُمكن إزالة مغناطيسية القلب الحديدي المتبقية وذلك لتخليص القلب الحديدي من هذه المغناطيسية والتي قد تؤدي لظهور تيارات إندفاع كبير (**High inrush currents**) عند كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد الإنتهاء من فحص (**WRM**)، حيث أن هذه التيارات قد تفوق قيمة الإرساء (**Setpoint**) الخاصة بحماية إرتفاع التيار للمحول (**Overcurrent**) مما يؤدي لحدوث فصل قسري (**Trip**) وإجهاد للمحول غير مرغوب به. ومن جهة أخرى يجب إزالة مغناطيسية القلب الحديدي المُتبقية تجنباً لتأثيرها على الفحوصات اللاحقة خاصة فحص نسبة عدد اللفات (**TTR**) وفحص تيار التهييج (**Excitation current**) و فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (**SFRA**) إذا ما تم إجراؤها مُباشرة بعد فحص مقاومة الملفات (**WRM**) أو بشكل عام الفحوصات التي تعتمد في فلسفتها بتطبيق فولتية ثابتة (**DC**) على ملفات المحول.



الشكل رقم (3-5-4)

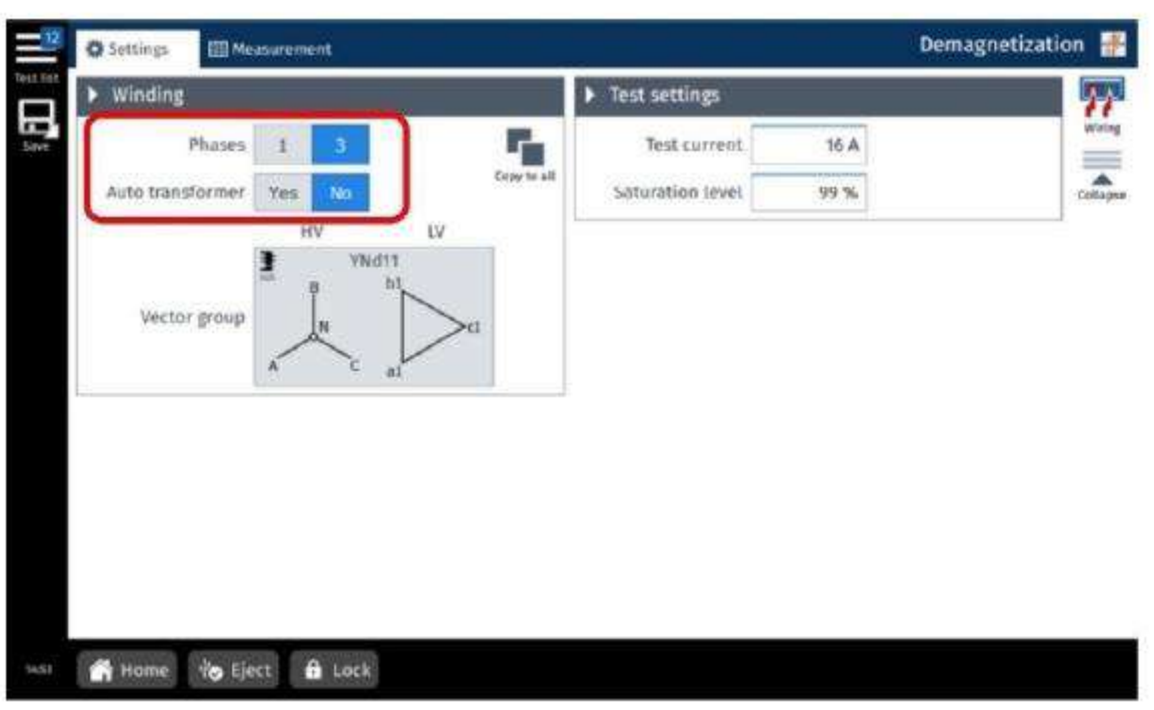
- **خطوات إزالة المغناطيسية بواسطة هذا الجهاز:**

1. إختيار إزالة المغناطيسية (**Demagnetization**) من القائمة الرئيسية الظاهرة على شاشة اللمس (**Touch Control**) والمُبينة في الشكل (**3-5-5**).



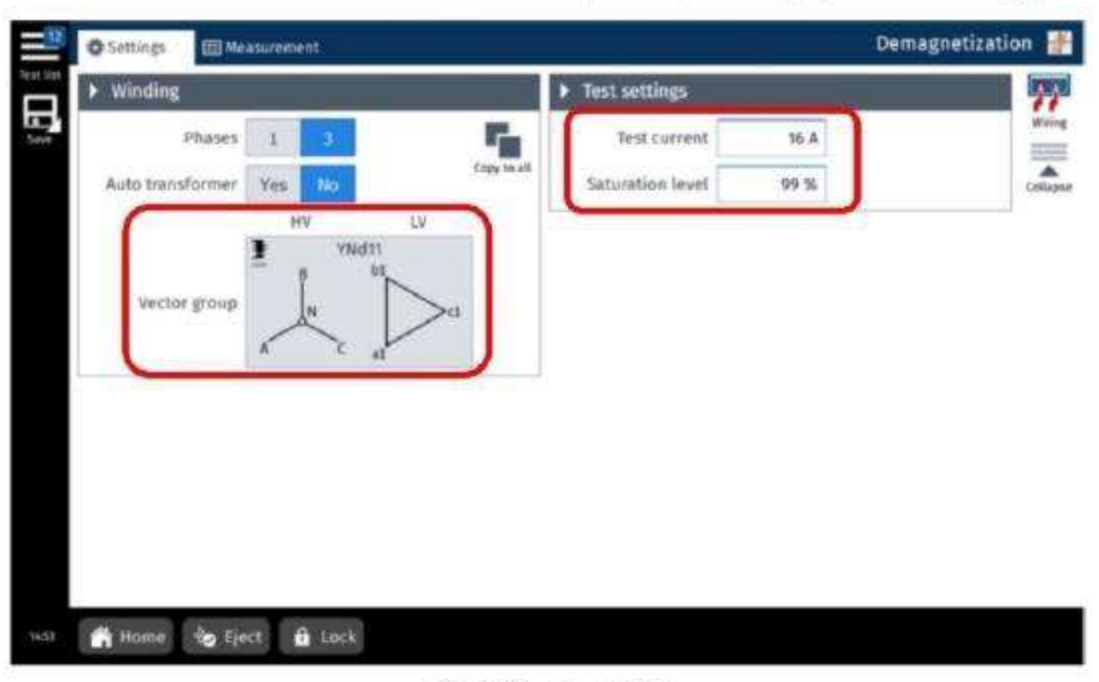
الشكل رقم (**3-5-5**)

2. لتظهر الشاسة المبينة في الشكل (**3-5-6**) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (**Settings**) يتم تحديد عدد أطوار المحول المُراد إزالة مغناطيسيته المُتبقية بالضغط على الرقم (**3**) أي أنه ثلاثي الطور (**3 phase transformer**)، ثم يتم الضغط على (**No**) بجانب المحول التلقائي (**Auto Transformer**).



الشكل رقم (**3-5-6**)

3. تحديد مجموعة التوصيل (**Vector group**) الخاصة بالمحول بالإضافة لتحديد قيمة التيار كما هو مبين في الشاشة الظاهرة في الشكل (**3-5-7**).



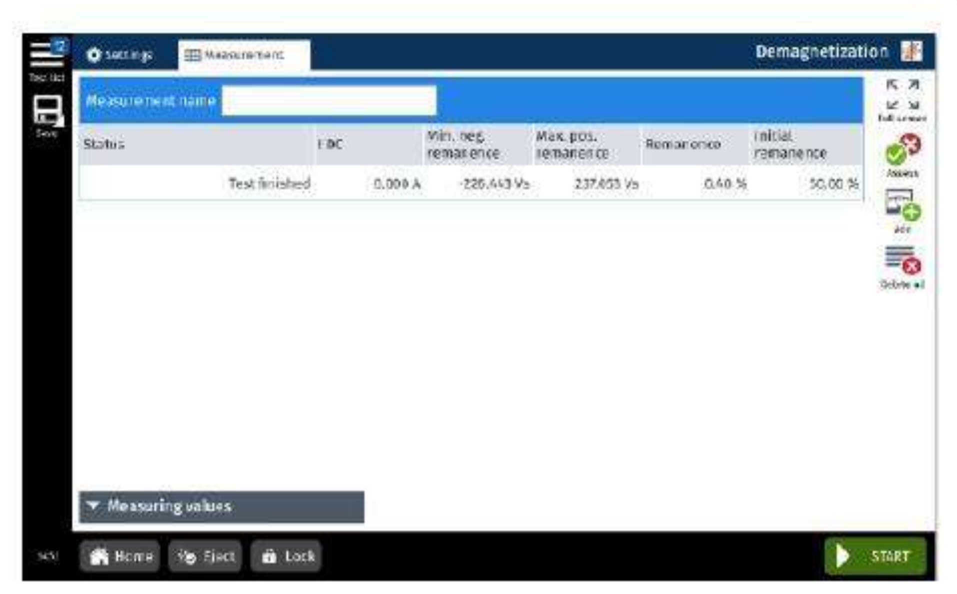
الشكل رقم (**3-5-7**)

4. الضغط على علامة التبويب قياسات (**Measurements**) المحاذية لنافذة التبويب إعدادات (**Settings**) لتظهر الشاشة المُبينة بالشكل (**3-5-8**) ثم نقوم بالضغط على زر إبدأ (**Start**) ثم التأكد من إنارة الحلقة الزرقاء حول زر (**Start/Stop**) وبذلك يكون الجهاز بوضعية الإستعداد للحقن.



الشكل رقم (**3-5-8**)

5. الضغط على زر إبدأ/توقف **(Start/Stop)** ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الضوء الأحمر و الحلقة الزرقاء حول زر **(Start/Stop)** بالوميض بشكل متقطع.
6. بعد الإنتهاء يومض الضوء الأخضر وبعدها يُمكن إيجاد النتائج في علامة التبويب قياسات **(Measurements)** كما هو مُبين بالشكل **(3-5-9)** وبذلك تكون قد إنتهت عملية إزالة المغنطة بنجاح.



الشكل رقم (3-5-9)

الفصل الرابع

فحص نسبة عدد لفات المحول

Transformer Turns Ratio Test (TTR)



فحص نسبة عدد لفات المحول
Transformer Turns Ratio Test (TTR)

يُعتبر فحص نسبة عدد لفات المحول من الفحوصات المُهمّة لمعرفة حالة الملفات الداخلية ولمحاكاة الخاصيّة التشغيلية الأساسية للمحول وهي تحويل الطاقة الكهربائية من مستوى فولتية إلى آخَر مع ثبات القدرة، حيث يُعبّر هذا الفحص عن نسبة عدد لفات ملفات الفولتية المرتفعة (**HV windings**) إلى عدد لفات ملفات الفولتية المنخفضة (**LV windings**) لكل طور من أطوار المحول، كما ويُعتبر هذا الفحص من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**) أي أنه لا يؤثر على سلامة العزل وذلك لأن مقدار فولتية الفحص أقل من مقدار الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول.

وكما ذُكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أيٍ من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكّن من الكشف عن سلامة نظام العزل والنظام الميكانيكي للمحول وذلك بالكشف عن وجود قِصَر بين اللفات (فشل نظام العزل)، أو وجود قَطع كُلّي بالملفات (فشل ميكانيكي) أو وجود مشكلة في القلب الحديدي للمحول.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعُنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المَصنعيّة (**Quality Control - QC**) وكذلك يُعتبر من فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهربة المحول للمرة الأولى (**Transformer first energization**) كأحد فحوصات القُبول المَوقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد عمليات الصيانة المُختلفة في الموقع، خاصة عمليات الصيانة التي يتم خلالها فتح دائرة الملفات كصيانة مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**).

1.4 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) من نوع (**De-energized Tap Changer DETC or OCTC**)، وذلك لضمان عدم وجود فتح بدائرة الملفات الداخلية للمحول (**Open circuit**).

1.5 للتأكد من مجموعة التوصيل للمحول (**Vector group**).

1.6 بشكل روتيني (**Routine test**) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (**Reference value**).

1.7 تحديد الأعطال داخل المحول (**Fault detection – Diagnostic test**)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال حدوث فصل قَسري للمحول (**Trip**) نتيجة لتفعّل مُرحل البوخلز (**Buchholz Relay**)، أو في حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الذائبة في الزيت (**Dissolved Gas Analysis - DGA**).

كما ويُعد تعرض المحول لإجهاد ميكانيكي كالإهتزازات أو النقل أو الصدمات، بالإضافة إلى تعرض المحول إلى إجهاد ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (**Earth Faults**) وما ينتج عنها من تيارات قِصَر ذات قِيَم مرتفعة من الأمور التي تدفعُنا لإجراء هذا الفحص بهدف تشخيصي.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود قَطع كُلي في ملفات المحول (**Open circuit**).
- وجود قِصَر (**Short circuit**) بين لفات الملفات المختلفة من المحول أو بين اللفات من نفس الملف.
- وجود نقاط توصيل رديئة (**Poor electrical connections**) في المحول، مثل وجود إرتخاء (**Loose**) في نقاط توصيل موصلات عوازل الإختراق أو كما تُسمى جُلَب المحول (**Bushing leads**) بملفات المحول، أو وجود إرتخاء في نقاط توصيل ملفات المحول بمغيّر الخطوة (**Tap changer**).
- وجود مشكلة في القلب الحديدي للمحول (**Iron Core**).

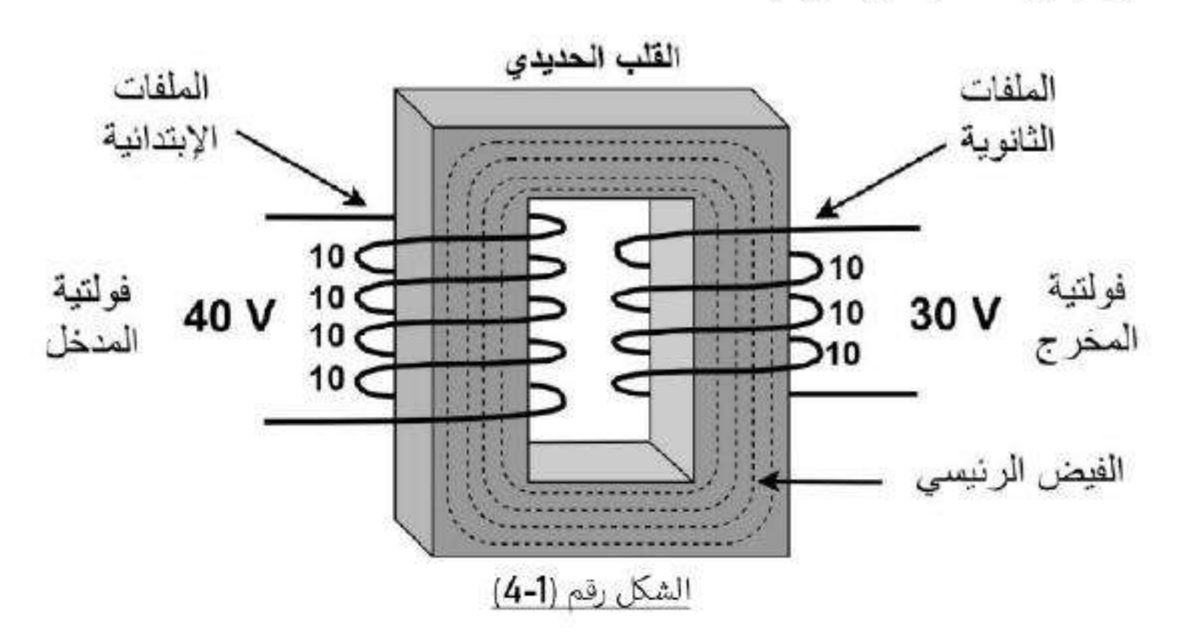
3. فلسفة الفحص

في هذا الفحص يتم قياس نسبة الفولتية للمحول بتطبيق فولتية مترددة (**AC Voltage**) على ملفات الفولتية المرتفعة (**HV Winding**) أو الفولتية المنخفضة (**LV Winding**) وقياس الفولتية المتولدة على أطراف المحول الأُخرى المفتوحة (**HV** أو **LV**) ومن ثم يتم إحتساب النسبة بين الفولتيتين (**RMS values**)، وهذا بدوره يُعطينا قيمة تُسمى نسبة الفولتية للمحول (**Transformer Voltage Ratio – TVR**) ومنها يُمكن معرفة نسبة عدد لفات المحول (**Transformer Turns Ratio – TTR**).

ولكن يبقى التساؤل المطروح "ما العلاقة التي تربط نسبة فولتية المحول (Transformer Voltage Ratio – TVR) بنسبة عدد اللفات لهذا المحول (Transformer Turns Ratio – TTR)؟ وهل هما نفس الشيء؟"

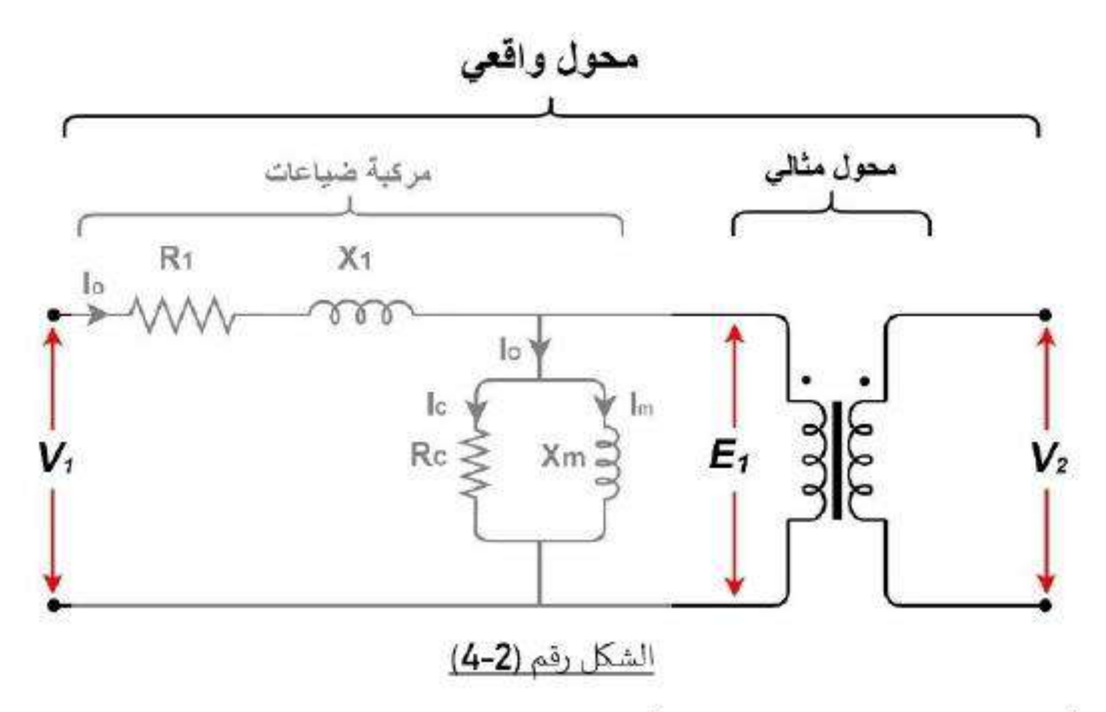
كإجابة عن هذا التساؤل وكما هو معلوم فإن عدد لفات الملفات الإبتدائية والثانوية للمحول تُحدد نسبة الفولتية التي سيتم تحويلها بإستخدام هذا المحول، أي أنه عند تطبيق فولتية مترددة على الملفات الإبتدائية للمحول فإن هذه الفولتية يتم تقاسمها بالتساوي بين لفات الملفات الإبتدائية بحيث يُصبح لكل لفة قيمة فولتية مُعيّنة خاصة بها (Voltage per turn) مساوية لفولتية باقي لفات الملفات الإبتدائية وكذلك الثانوية كما هو مُبين بالشكل (1-4)، ومن خلال ذات الشكل يُمكن ملاحظة أن جميع لفات ملفات المحول تحمل نفس المقدار من الفولتية مما يُولد رابطاً قوياً بين عدد لفات ملفات المحول من جهة ونسبة الفولتية المتولدة على أطرافه من جهة أُخرى، وأي إختلاف في عدد اللفات سوف يُصاحبه إختلاف في الفولتية المتولدة.

حيث أننا لو قُمنا على سبيل المثال بتثبيت فولتية المدخل وإنقاص عدد لفات الملف الإبتدائي للمحول الظاهر في الشكل (1-4)، فإن قيمة فولتية اللفات المتبقية (Voltage per turn) سوف تزداد للملفات الإبتدائية والثانوية مما يعني زيادة في قيمة الفولتية الثانوية المتولدة. وهذا بدوره يوضح مبدأ عمل مُغيّر الخطوة (Tap-changer) بشكل مُبسّط.



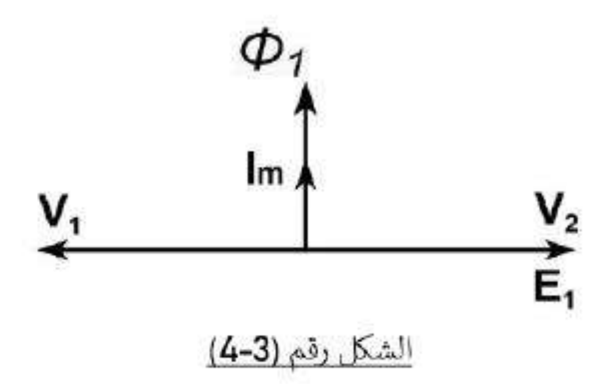
الشكل رقم (1-4)

وكنتيجة أولية لما تم شرحه يُمكن القول أن نسبة الفولتية للمحول (TVR) مساوية لنسبة عدد لفات المحول (TTR) تحت ظروف مُعيّنة، حيث أنه للمحول المثالي (Ideal Transformer) في حالة اللاحمل أو الدائرة المفتوحة (Open Circuit أو No-Load) - أي أن أطرافه الثانوية مفتوحة وغير متصلة بحمل - تكون نسبة الفولتية للمحول (Transformer Voltage Ratio - TVR) مساوية لنسبة عدد لفات المحول (Transformer Turns Ratio - TTR)، ويُمكن ملاحظة ذلك من الرسم الموضح في الشكل (2-4) للدائرة المكافئة للمحول.



الشكل رقم (4-2)

حيث أن نسبة الفولتية (**TVR**) على إعتبار أن المحول مثالي (**Ideal Transformer**) تساوي ناتج قسمة (E_1/V_2) الظاهرة في الشكل (**4-2**)، ونظراً لإهمال تيار اللاحمل (**No-Load Current - I_o**) وما ينتج عنه من هبوط بالفولتية فإن قيمة نسبة الفولتية (**TVR**) تكون مساوية لقيمة نسبة عدد لفات المحول (**TTR**) كما هو مُبين في الرسم المُتجهي الموضح في الشكل (**4-3**) والخاص بمحول مثالي (**Ideal Transformer**) آحادي الطور نسبة تحويله **1:1** في حالة اللاحمل أو الدائرة المفتوحة (**Open Circuit or No-Load**).

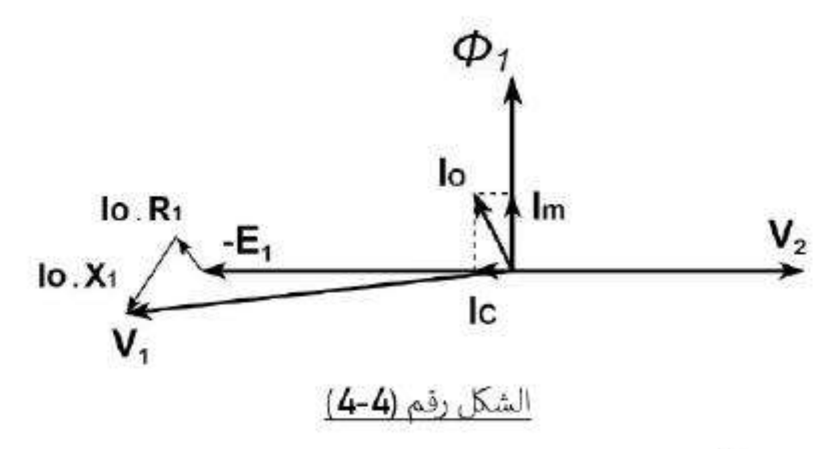


الشكل رقم (4-3)

أما عملياً فيما يَخُص المحولات الواقعية (**Actual Transformer**) في حالة اللاحمل (**No-load**) فإن نسبة الفولتية للمحول (**TVR**) تكون أقل من نسبة عدد لفات المحول (**TTR**) بقليل، ويَعود هذا الإختلاف بين القيمتين للضياعات المختلفة في الفولتية والناتجة عن:

- ✔ قيمة مقاومة الملفات الإبتدائية (R_1) و التي تُمثل الضياعات المادية أو النحاسية.
- ✔ قيمة المُفاعلة الحثية للملفات الإبتدائية (X_1) التي تُمثل ضياعات الفيض المُتسرب.
- ✔ قيمة تيار اللاحمل (I_O) والذي يعتمد على قيمة المقاومة المادية (R_C) وقيمة المُفاعلة الحثية (X_m) بالإضافة لقيمة الفولتية (V_1) المُطبقة على الملفات الإبتدائية.

ومنه فإن نسبة الفولتية للمحول الواقعي (**Actual Transformer**) تكون ناتج قسمة (V_1/V_2) الظاهرة في الدائرة المكافئة الموضحة بالشكل (**2-4**) السابق. كما ويُمكن ملاحظة الإختلاف في قِيَم الفولتيات الناتج عن الضياعات سابقة الذكر من خلال الرسم المُتجهي والموضح في الشكل (**4-4**) والخاص بمحول واقعي (**Actual Transformer**) آحادي الطور نسبة تحويله **1:1** في حالة اللاحمل (**No-load**).



الشكل رقم (**4-4**)

الخلاصة: يُمكن إعتبار أن قيمة نسبة عدد لفات المحول (**TTR**) تساوي حاصل قسمة (E_1/V_2) الظاهرة في الشكل (**2-4**) السابق، و لصعوبة معرفة قيمة الفولتية (E_1) فإن القيمة التي يتم قياسها خلال هذا الفحص هي حاصل قسمة (V_1/V_2) والتي تكون أقل من قيمة نسبة عدد لفات المحول (E_1/V_2) بنسبة تباين قرابة الـ (**0.1%**) بالمئة نتيجة للضياعات في المحول الواقعي الناتجة عن قيمة $(R_1, X_1, and\ I_O)$.

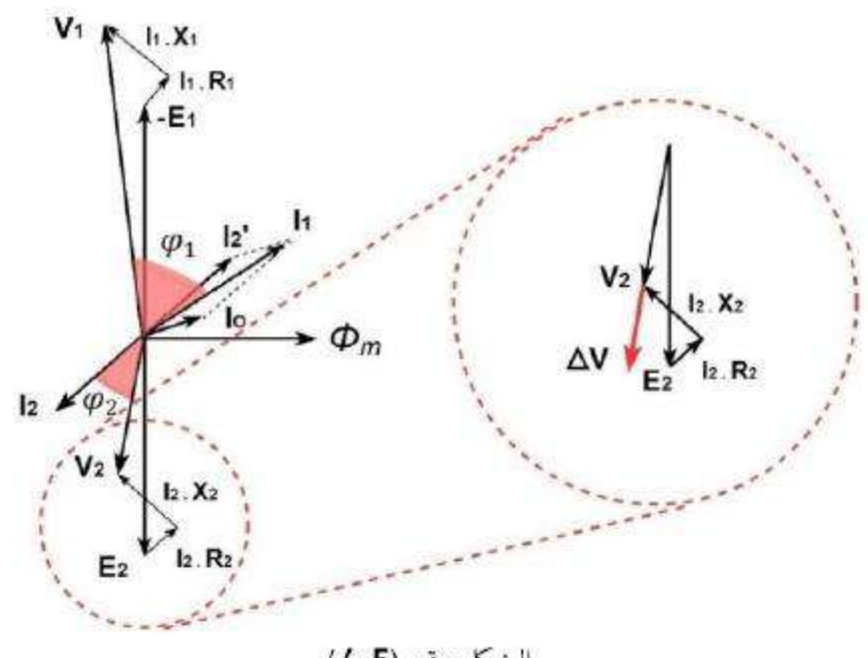
وهذه المُركبات $(R_1, X_1, and\ I_O)$ تكون ذات قيمة ثابتة ومعلومة أثناء الظروف التشغيلية الإسمية للمحول، أم أثناء الفحص ولإنخفاض قيمة الفولتية المُطبقة (مما يعني كثافة فيض مغناطيسي أقل في القلب الحديدي) فإن قيمة المُركبات (R_C و X_m) لا يُمكن معرفتها لأنها تعتمد على قيمة كثافة الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي، ولسوء الحظ لا يُمكن معرفة قيمة تيار اللاحمل (I_O) نتيجة لإختلاف قيمة المقاومة المادية (R_C) و المفاعلة الحثية (X_m) اللتان تعتمدان على قيمة كثافة الفيض في القلب الحديدي أثناء الفحص.

- **لماذا يجب إجراء هذا الفحص أثناء فتح أطراف المحول أو ما يُسمى بحالة اللاحمل (No-Load أو Open circuit)؟**

عندما يكون المحول غير مُتصل بحمل على أطرافه الثانوية تكون فولتية هذه الأطراف تقريباً مساوية للفولتية المُطبقة على الملفات الإبتدائية ونسبة التباين لا تتجاوز الـ(**0.5%**) بالمئة على إعتبار أن المحول نسبة تحويله (**1:1**)، وذلك نتيجة لتأثير قيمة مقاومة الملفات الإبتدائية وقيمة الفيض الإبتدائي المُتسرب والذي تم شرحه سابقاً، أما في حال كان المحول متصل بحمل فإن الفولتية المتولدة على الأطراف الثانوية ستكون غير مساوية للفولتية المُطبقة على الملفات الإبتدائية ويعود هذا الإختلاف للأسباب التالية:

- ✔ مقدار زاوية الطور بين الفولتية المتولدة على الأطراف الثانوية و تيار الملف الثانوي وكذلك طبيعة الحمل فيما إذا كان حمل حثي (زاوية طور ذات قيمة سالبة) أو حمل سعوي (زاوية طور ذات قيمة موجبة). أي بمعنى آخر أن فولتية المحول الثانوية تزداد في حال إتصاله بحمل سعوي و تنخفض في حال إتصاله بحمل حثي.
- ✔ مقدار التيار المار في الملفات الثانوية (مقدار تحميل المحول) وما ينتج عنه من مركبات للضياعات في مقاومة الملفات الثانوية (R_2) و المُفاعلة الحثية للملفات الثانوية (X_2). حيث أنه وكما هو معلوم أن مقدار التيار يتناسب طردياً مع مقدار الضياعات، ففي حالة اللاحمل (**No-load**) تكون قيمة التيار الثانوي (I_2) مساوية للصفر مما يعني ضياعات ثانوية ناتجة عن (R_2 و X_2) مساوية للصفر، والعكس بالعكس في حال وصل المحول بحمل.
- ✔ مُعاوقة القِصَر للمحول (**Short-circuit impedance**). حيث أن قيمتها تتناسب تناسباً طردياً مع مقدار الهبوط في الفولتية (**Voltage drop**).

وهذا الإختلاف في الفولتية على أطراف الملف الثانوي للمحول بين حالة عدم التحميل (**No-load** أو **Open circuit**) و حالة التحميل (**Loaded**) يُمكن ملاحظته عبر الرسم المُتجهي التالي والموضح في الشكل (**4-5**) لمحول متصل بحمل حثي على إعتبار أن نسبة التحويل (**1:1**).



الشكل رقم (**4-5**)

حيث:

E_2 : فولتية الأطراف الثانوية في حالة اللاحمل (**No-load** أو **Open-circuit**).

V_2 : فولتية الأطراف الثانوية في حالة التحميل (**Loaded**).

$I_2.R_2$: فولتية القِصَر الفعالة (**Active short-circuit voltage**).

$I_2.X_2$: فولتية القِصَر غير الفعالة (**Reactive short-circuit voltage**).

I_2 : تيار الملفات الثانوية الفعلي.

ΔV : فرق الفولتية بين حالة عدم التحميل و حالة التحميل لملفات المحول الثانوية (مقدار الهبوط في الفولتية نتيجة لوصل المحول بحمل حثي).

ولحساب مقدار الهبوط في الفولتية (ΔV) نتيجة لوصل المحول بحمل حثي بالإعتماد على المخطط المُتجهي السابق يُمكن إيجاد هذه المعادلة:

$$\Delta V = \Big[n(I_2 . R_2 \cos \Phi \, 0.016 + I_2 . X_2 \sin \Phi \, 0.036) + 1 - \sqrt{1 - n^2 (I_2 . R_2 \sin \Phi \, 0.012 - I_2 . X_2 \cos \Phi \, 0.048)^2}\,\Big] . E_2$$

$$n = \frac{I}{I_2}$$

حيث:

n : التحميل النسبي للمحول.

I_2 : التيار الفعلي للملفات الثانوية.

I : التيار الإسمي للملفات الثانوية.

فمثلاً لو كانت قيمة التحميل النسبي للمحول (n) مساوٍ لـ(**1**) أي أن المحول محمل تحميلاً كاملاً و قيمة فولتية القِصَر الفعالة ($I_2 . R_2$) مساوية لـ(**0.02**) و قيمة فولتية القِصَر غير الفعالة ($I_2 . X_2$) مساوية لـ(**0.06**) و معامل القدرة مساوٍ لـ(**0.8**) وكان الحمل حثي وبعد تطبيق المعادلة السابقة فإن مقدار الهبوط في الفولتية (ΔV) سيساوي قرابة الـ(**5%**) بالمئة من الفولتية الكاملة للمفات الثانوية في حالة عدم التحميل (E_2).



ملحوظة (1-4): في حال كان الحمل المُتصل بالمحول حمل حِثي فإن فولتية التحميل (V_2) ستكون منخفضة مقارنة بفولتية اللاحمل (E_2) للمحول، أما في حالة الحمل السعوي فإن فولتية التحميل (V_2) ستكون مرتفعة مقارنة بفولتية اللاحمل (E_2) للمحول.

لذلك ولتجنُّب تأثير فرق الفولتية الناتج عن تحميل أو قَصر الأطراف الثانوية للمحول (**Short circuit or Loading**)، يُنصح بإجراء هذا الفحص أثناء فتح أطراف (**Open Circuit**) المحول الثانوية أو ما يُسمى بحالة اللاحمل (**No-load**).

- **كيف يَدُل هذا الفحص على وجود قِصَر (Short circuit) أو قطع كُلّي (Open circuit) في ملفات المحول أو وجود عطل في القلب الحديدي:**

في حال حدوث قِصَر بين لفات ملفات المحول (**Short circuit or interturn**) فإن هذا القِصر يَنتُج عنه تيارات دوّارة (**Circulating currents**) مُحدثة زيادة في الفيض المُتسرب، والذي من شأنه عمل إختلاف بين الفولتية المُطبّقة على الملفات الإبتدائية والفولتية المُتولدة على أطراف الملفات الثانوية مما يعني إختلاف في قيمة فحص نسبة لفات المحول (**TTR**) المُشتقة من قيمة نسبة الفولتية للمحول (**TVR**) ومنه يُمكن كشف هذا النوع من الأعطال.

أما فيما يَخُص حدوث قطع كُلي في الملفات (**Open Circuit**) فإنه يُمكن تلخيص هذه الحالة بالإحتمالات التالية (في حال فحص كل طور على حدا أي بإستخدام مصدر فولتية آحادي الطور):

- ✔ **وجود قطع كُلي في الملفات الإبتدائية الموصولة على شكل نجمة (Star - Y).**

في هذه الحالة عند تطبيق فولتية على ملف الطور المعطوب (مكان وجود القطع) فإن الفيض بالغالب لن يتكون بالقلب الحديدي ولن يتم الحصول على قراءات فولتية على أطراف الملف الثانوي.

- ✔ **وجود قطع كُلي في الملفات الإبتدائية الموصولة على شكل مثلث (Delta - Δ).**

في هذه الحالة عند تطبيق فولتية على الملف المعطوب (مكان وجود القطع) فإن الفيض المتكوّن في القلب الحديدي هو بسبب شحن الملفين الآخرين (السليمين)، مما يعني تكوّن فولتية على أطراف الملف الثانوي بمستوى أقل من المستويات الطبيعية مما يؤثر على نتيجة الفحص ويدُلّ على وجود هذا النوع من الأعطال.

- ✔ **وجود قطع كُلي في الملفات الثانوية.**

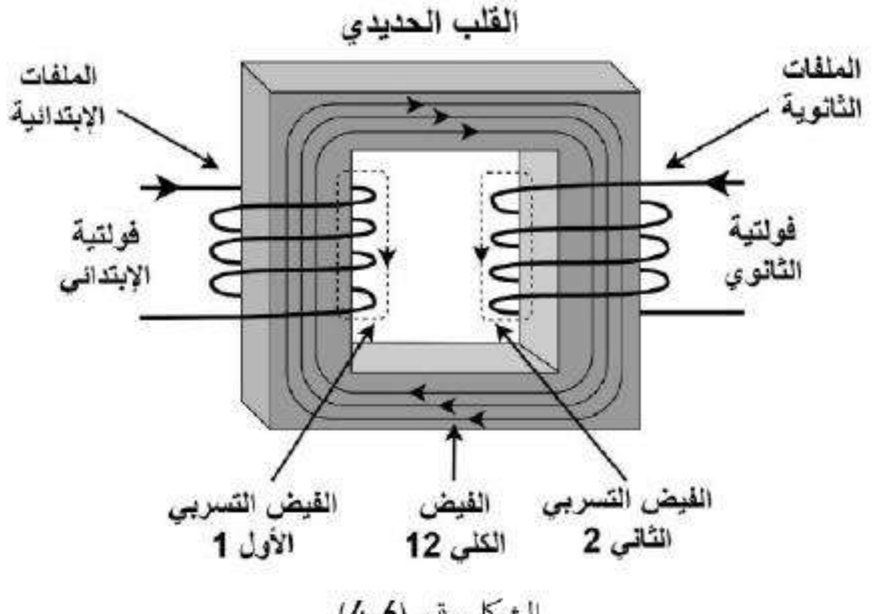
في هذه الحالة لن يمر تيار في الملفات الثانوية وسوف يتم قراءة صفر فولتية بواسطة جهاز قياس الفولتية مما يعني قيمة نسبة فولتية لا نهائية (ناتج قسمة قيمة فولتية الملفات الإبتدائية على صفر).



ملحوظة (2-4): هذا الفحص يُساعد على كشف الأعطال التي تتعلق بالقطع الكُلي (**Open circuit**) للملفات بكفاءة عالية، أم فيما يَخُص القطع الجُزئي (**Crack**) للملفات فإن هذا الفحص غير فعال كفاية ويجب الإستعانة بفحوصات أخرى أكثر كفاءة وحساسية حيال هذا النوع من الأعطال مثل فحص مقاومة الملفات (**Winding resistance - WRM**).

وفيما يَخُص أعطال القلب الحديدي (**Iron Core**) للمحول فإنه عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات الفولتية المرتفعة (**HV windings**) سيتولد فيض في القلب الحديدي بشكل يتناسب طردياً مع قيمة الفولتية لكل لفة (**Voltage per turn**)، ولكن عملياً هذا الفيض المُتولد نتيجة لمرور تيار في الملف الإبتدائي لا ينتقل (**Coupled**) عبر القلب الحديدي الى الملف الثانوي بنسبة مئة بالمئة على شكل فيض مشترك (**Mutual flux**)، وإنما هنالك جزء يكون على شكل فيض متسرب (**Leakage flux**) وذلك يعتمد على:

- ✔ قيمة محاثة ملفات المحول (**Winding Inductance**).
- ✔ تصميم القلب الحديدي (**Core Design**).
- ✔ تركيب القلب الحديدي (**Core Construction**).
- ✔ نفاذية القلب الحديدي (**Core Permeability**).



الشكل رقم (4-6)

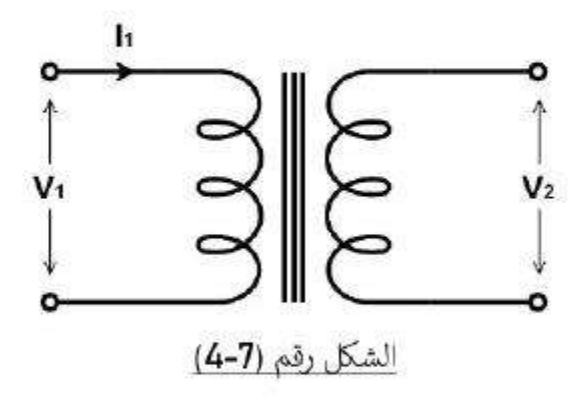
حيث أن الفولتية المُتولدة على أطراف الملفات الإبتدائية تعتمد على قيمة محاثة الملفات الإبتدائية كما هو مُبين بالمعادلة (**4.1**) التالية:

$$V_1 = L_1 \cdot \frac{d_{i_1}}{d_t} \quad (4.1)$$

أما الفولتية المتولدة على أطراف الملفات الثانوية فإنها تعتمد على قيمة المحاثة المشتركة (**Mutual Inductance**) كما هو مبين بالمعادلة (**4.2**) التالية:

$$V_2 = M_{12} \cdot \frac{d_{i_1}}{d_t} \quad (4.2)$$

حيث أنه وبالرجوع لمنحنى (**B-H**) الخاص بالمادة المُكوِّنة للقلب الحديدي يُمكن ملاحظة أن شدة المجال المغناطيسي (H) غير ثابتة وإنما تتغير بتغيُّر الفولتية المُطبقة، فبزيادة الفولتية المُطبقة تزداد شدة المجال المغناطيسي وكذلك النفاذية المغناطيسية (μ) مما يزيد الفيض المشترك بين الملفات الإبتدائية والثانوية (**Mutual Flux -** M_{12}).



الشكل رقم (4-7)

لذلك يُمكن لهذا الفحص الكشف عن وجود مشاكل في القلب الحديدي للمحول كوجود مشكلة في تركيب القلب أو وجود فشل في العزل بين الرقائق المعدنية المُكونة للقلب، والتي بدورها تأثر على قيمة الفيض المُنتقل من الملفات الابتدائية للملفات الثانوية (**Mutual Flux -** M_{12}) مما يؤدي لإختلاف قيمة الفولتية المُتولدة ومنه إختلاف قيمة نسبة الفولتية للمحول (**TVR**) وقيمة فحص نسبة لفات المحول (**TTR**) المُشتقة منها.

كما ويُمكن الكشف عن أعطال القلب الحديدي كوجود قِصَر بين الرقائق المُكونة للقلب الحديدي عن طريق قياس إنحراف الطور (**Phase Deviation**) والذي يزداد بإزدياد قيمة التيارات الدوّامية في القلب والناتجة عن قِصَر بين الرقائق سابقة الذِكر، وتَجدُر الإشارة إلى أن بعض أجهزة فحص نسبة عدد اللفات الحديثة تقوم بإظهار مقدار إنحراف الطور (**Phase Deviation**) بالإضافة إلا قيمة نسبة عدد اللفات (**TTR**) وفي بعض الأحيان تُعطي هذه الأجهزة قيمة تيار التهييج (**Excitation Current**) والذي من شأنه أيضاً الكشف عن أعطال القلب الحديدي والذي سيأتي ذِكره في الفصل الخامس بشكل مفصّل كفحص مُستقل.

4. طُرق الفحص

يُمكن إجراء هذا الفحص بالطريقة التقليدية أو كما تُسمى بطريقة جهاز قياس الفولتية (**Voltmeter method**)، أو بواسطة أجهزة الفحص الإلكترونية الحديثة وذلك وفقاً للتجهيزات المتوفرة في موقع الفحص كالآتي:

4.1 طريقة جهاز قياس الفولتية – Voltmeter Method

كما ذُكر أنفاً فإن هذا الفحص يتم بتطبيق فولتية مترددة (**AC Voltage**) على الملفات الإبتدائية وقياس الفولتية المُتولدة على أطراف الملفات الثانوية المفتوحة للمحول ومن ثم يتم إحتساب النسبة بين الفولتيتين (**RMS values**)، ويتم ذلك بإستخدام مصدر فولتية مترددة (**AC voltage**) آحادي الطور (**Single phase**) أو ثلاثي الطور (**Three phase**) حيث يَفضّل إستخدام المصدر آحادي الطور للكشف عن حالات القَطع الكُلي للملفات (**Open circuit**) بكفاءة أكبر.

ويتم إجراء هذا الفحص بهذه الطريقة بأسلوبين رئيسين:

- ✓ **الأسلوب التنازلي - Step-Down method**: وذلك بتطبيق الفولتية المترددة (**AC voltage**) على ملفات الفولتية المرتفعة (**HV windings**) و قياس الفولتية المُتولدة على أطراف ملفات الفولتية المنخفضة (**LV winding**)، وهذا الطريقة أكثر أماناً حيث أنه لا خوف من ظهور فولتيات مرتفعة على أطراف قياس الفولتية.
- ✓ **الأسلوب التصاعدي - Step-Up method**: وذلك بتطبيق الفولتية المترددة (**AC voltage**) على ملفات الفولتية المنخفضة (**LV winding**) و قياس الفولتية المُتولدة على أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**)، وعادة ما يتم إستخدام هذه الأسلوب عند فحص المحولات ذات الملفات الثانوية الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**) أو المحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات (**Tertiary Windings Transformers**) ولكن بالمقابل يُمكن إعتبار هذه الطريقة أقل

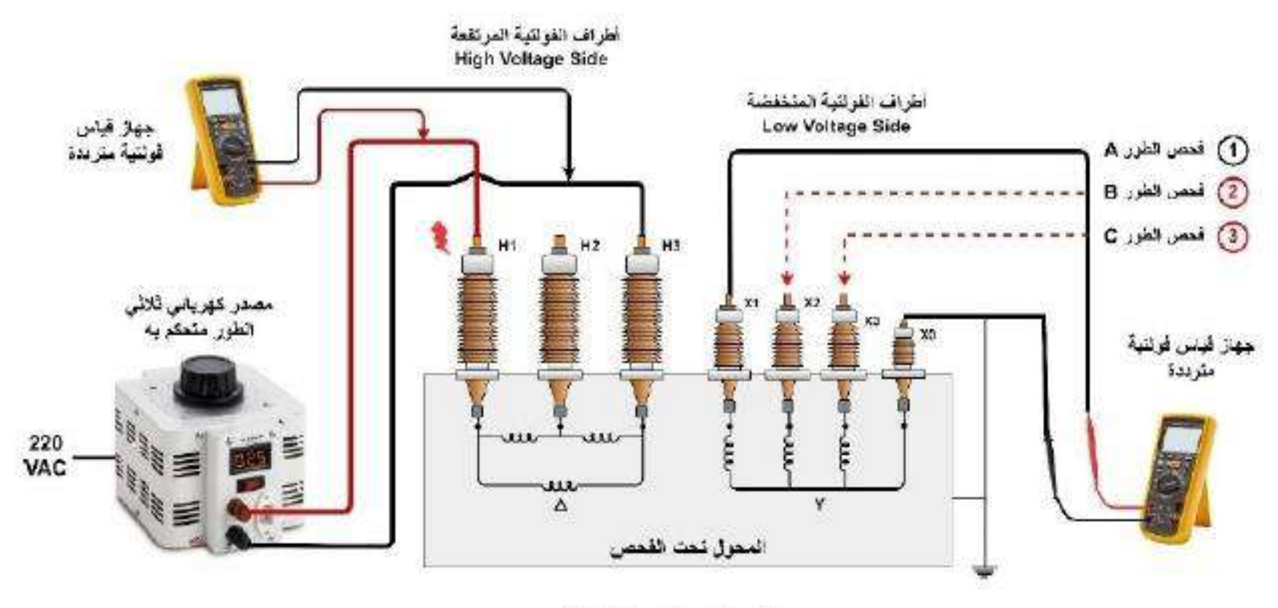
آماناً نتيجة لإمكانية ظهور فولتيات مرتفعة على أطراف القياس الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**).

- **المُعدات المُستخدمة بالفحص**
  - **مصدر كهربائي (Power Supply)**: مصدر فولتية مترددة مُتحكم به (**Regulated AC Power Supply**) أو كما يُسمى (**Variable AC Power Supply - VARIAC**) آحادي الطور أو ثلاثي الطور ذو مستوى فولتية مناسب (**150 – 300**) فولت، كما يجب التأكد من أن هذا المصدر المُتحكم به مُعاير (**Calibrated**).
  - **جهاز قياس فولتية مترددة (AC) رقمي (Digital Voltmeter)**: ذو دِقة عالية (**high Accuracy**) وكذلك ذو تدريج (**Scale**) مناسب لقِيَم الفحص، كما يجب التأكد من أنه مُعاير (**Calibrated**).
  - أسلاك توصيل (**Test Wires**) ومرابط (**Clamps**).

- **توصيلة الفحص**
  - **في حال كان المحول المُراد فحصة ثلاثي الأطوار (Three Phase) ذو ملفات ذات نقطة تعادل (Neutral point) يُمكن الوصول إليها (أي أنه موصول بطريقة النجمة خارجياً)؛**

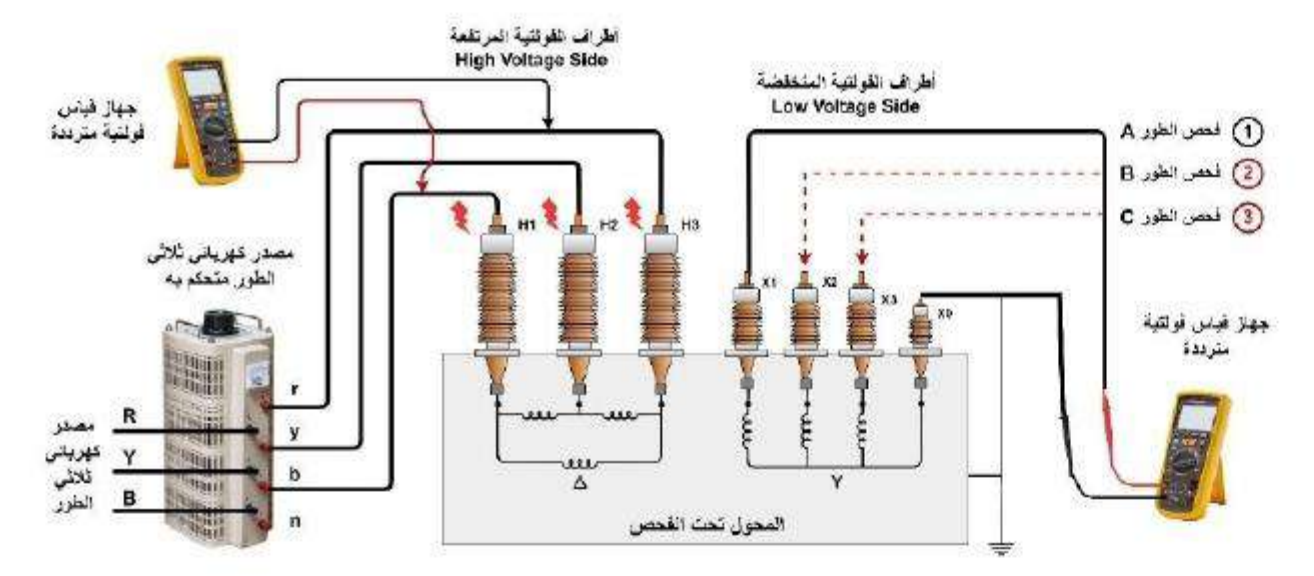
في هذه الحالة يُنصح بإستخدام مصدر فولتية آحادي الطور (**single phase**) للفحص كما ويُمكن إستخدام مصدر ثلاثي الطور حسب **[IEEE, C57.12.90-2015]**.

الشكل (**4-8**) يُبين توصيلة الفحص بإستخدام مصدر فولتية آحادي الطور لمحول ذو مجموعة توصيل (**Dyn1**) كمثال.



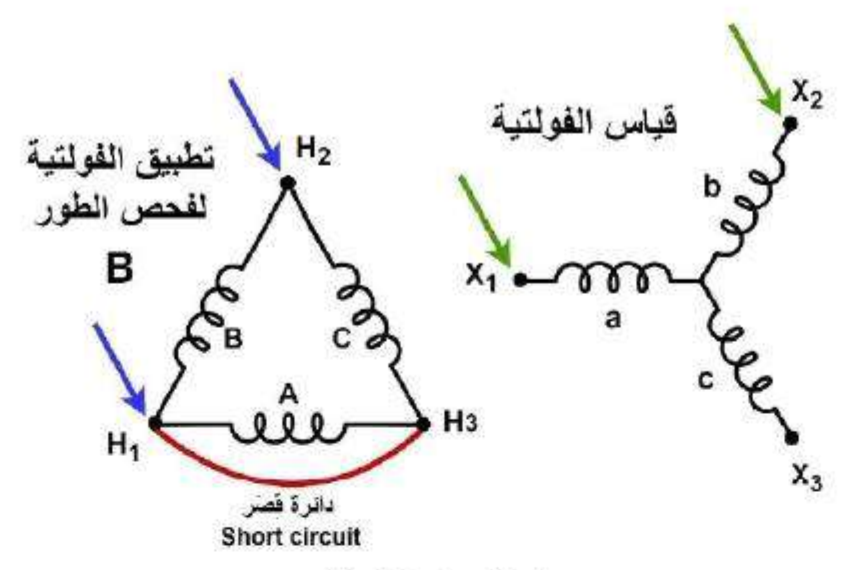
الشكل رقم (**4-8**)

الشكل (**4-9**) يُبين توصيلة الفحص بإستخدام مصدر فولتية ثلاثي الطور لمحول ذو مجموعة توصيل (**Dyn1**) كمثال.



الشكل رقم (**4-9**)

- **في حال كان المحول المُراد فحصة ثلاثي الأطوار (Three Phase) ذو ملفات ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول إليها (أي أنه موصول بطريقة النجمة داخلياً)؛**
في هذه الحالة يُمكن إجراء الفحص بإستخدام مصدر فولتية آحادي الطور (**single phase**) مع ضرورة عمل بعض الإجراءات كوضع وصلة قِصَر لتكوين نقطة تعادل إفتراضية كما هو مُبين في الشكل (**4-10**).



الشكل رقم (**4-10**)

الشكل السابق يُبين توصيلة فحص الطور (**B**) لمحول ذو توصيلة ملفات (**Dy1**)، ولفحص باقي الأطوار يُمكن الرجوع للجدول (**4-1**)، والذي يوضح الأطراف الواجب قصرها والأطراف التي

يجب حقن الفولتية عليها وكذلك أطراف قياس الفولتية لهذا النوع من توصيلات المحولات، ولباقي مجموعات التوصيل يُمكن إيجاد المُلحق **(3-4)** في نهاية الفصل.

الجدول رقم **(1-4)**

الطور المُراد فحصه	الأطراف الواجب قَصرها	أطراف حقن الفولتية	أطراف قياس الفولتية
A	H1 – H2	H3 – H1	X2 – X1
B	H1 – H3	H1 – H2	X1 – X2
C	H1 – H3	H2 – H3	X1 – X3



ملحوظة (3-4): في حال كانت ملفات الفولتية المرتفعة موصولة على شكل نجمة **(Star – Y)** يجب إبقاء نقطة التعادل مفتوحة، أي الحقن يكون ثلاثي الأطوار بثلاثة أسلاك فقط **(Three Phase Three Wires)**.

4.2 بإستخدام أجهزة الفحص الحديثة؛ مثل جهاز **(TESTRANO 600 by OMICRON)** كما سيتم شرحه بالملحق رقم **(1-4)**، وجهاز **(TTRU3 by MEGGER)** كما سيتم شرحه في الملحق **(4-2)**.

5. خطوات الفحص

بعد التعرُّف على فلسفة الفحص وطرُق إجراؤه والتوصيلات اللازمة لذلك، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً **(Transformer De-energization)** مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل **(Lock-out Tag-out LOTO)**.

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خِشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمَّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing]** والمعهد الوطني الأمريكي للمعايير **[ANSI National Electrical Safety Code]** ومُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية **[OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]**.

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**) وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) وكذلك الحال بنقطة التعادل (**Neutral point**) للمحول إن وجدت.



تحذير: يجب تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (**Earthing Dis-connector**) أو المتنقلة (**Portable**) قبل البدأ بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines - OHL**) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.

5.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (**Trapped Charges**) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قِصَر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص.

5.6 في حال سبق إجراء هذا الفحص إجراء أي من الفحوصات التي تعتمد على الفولتية الثابتة (**DC**) مثل فحص مقاومة العازل (**Insulation resistance**) أو فحص مقاومة الملفات (**Winding Resistance**) يجب إزالة المغناطيسية المُتبقة (**De-magnetization**) بالطرق الواردة في نهاية الفحصين سابقي الذكر (الفصل الثاني و الثالث)، وذلك لأن نتيجة هذا الفحص تتأثر بقيمة المغناطيسية المُتبقية وتشبُّع القلب الحديدي للمحول.

5.7 مراعاة أن تكون باقي الملفات الخاصة بالمحول مفتوحة (**Open circuit**) أثناء الفحص.

5.8 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما هو مُبين في فقرة توصيلة الفحص والأشكال (**4-8&9&10**) السابقة والتي تُبين طريقة الفحص بالأسلوب التنازلي (**Step-down**) بعد التأكد من تنظيف أطراف المحول التي سيتم التوصيل عليها حتى لا تؤثر على قيمة الفحص.

5.9 تطبيق فولتية مترددة (**AC voltage**) على أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (**HV windings**).

5.10 قياس الفولتية المُتولدة على أطراف ملفات الفولتية المنخفضة (**LV windings**) وذلك تبعاً لمجموعة التوصيل الخاصة بالمحول، الجدول (**4-2**) يُبين مجموعة التوصيل للمحول المُراد فحصه والأطراف التي يجب تطبيق الفولتية المترددة عليها والأطراف التي يجب قياس الفولتية عليها على إعتبار أن أسلوب الفحص المُتبع هو الأسلوب التنازلي (**Step-down**):

كما وتجدُر الإشار إلى أن الجدول التالي يَضُم مجموعتي التوصيل (**Dyn1** و **YNd11**) وهي الأكثر شيوعاً كمحولات قدرة وتوزيع في الأردن بالإضافة إلى محولات ذات مجموعة التوصيل (**Dd0** و **Dd0-d0**) سبق وأن تعاملت معها.

الجدول رقم (4-2)

مجموعة التوصيل	ملفات الفحص	أطراف حقن الفولتية	أطراف قياس الفولتية
YNd11	HV-LV Ynd11	U-N	u-w
		V-N	v-u
		W-N	w-v
Dyn1	HV-LV Dyn1	U-W	u-n
		V-U	v-n
		W-V	w-n
Dd0	HV-LV Dd0	U-V	u-v
		V-W	v-w
		W-U	w-u
Dd0-d0	HV-LV1 Dd0	U-V	u1-v1
		V-W	v1-w1
		W-U	w1-u1
	HV-LV2 Dd0	U-V	u2-v2
		V-W	v2-w2
		W-U	w2-u2
	LV1-LV2 dd0	u1-v1	u2-v2
		v1-w1	v2-w2
		w1-u1	w2-u2

*لباقي مجموعات التوصيل يرجى إيجاد الجدول بالملحق رقم (4-3)

5.11 قسمة الفولتية المُطبقة على ملفات الفولتية المرتفعة (**HV**) على الفولتية المُقاسة على ملفات الفولتية المنخفضة (**LV**) ومن ثم تصحيح النتيجة وفقاً للطريقة الواردة في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة التي سيتم شرحها.

5.12 في حال كانت الملفات المفحوصة تتكون من عدة ملفات فرعية، أي في حالة وجود مُغيّر خطوة (**Tap-changer**) فإنه يتم تطبيق هذا الفحص على جميع الخطوات (**Taps**).



فائدة عملية: في حال كان مُغيّر الخطوة من نوع (**De-energized Tap Changer - DETC**)، وبعد الإنتهاء من الفحص على جميع الخطوات (**Taps**) يجب إعادة المحول على الخطوة المرجعيّة (**Reference Tap**) أي التي كان عليها مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) قبل الفحص أثناء التشغيل الطبيعي للمحول ومن ثم فحص المحول مرة أُخرى وذلك للتأكد من عدم وجود فتح في الدائرة (**Open Circuit**) قبل كهربة المحول (**Transformer energization**).



فائدة عملية: يجب عمل تمرين لمُغيّر الخطوة من النوع (**De-energized Tap Changer - DETC**) على الأقل مرة واحدة سنوياً، وفي حل تعذُر عمل هذا التمرين لظروف تشغيلية أو غيرها من الظروف فإنه لا يُنصح بتغير وضعية مُغيّر الخطوة وإنما يجب تطبيق هذا الفحص على الخطوة المرجعيّة (**Reference Tap**) أي التي كان عليها مُغيّر الخطوة أثناء التشغيل الطبيعي فقط خوفاً من إحداث عطل في مُغيّر الخطوة نحن في غنى عنه.

6. تصحيح القيمة المُقاسة

قبل الخوض في تفاصيل تصحيح القيمة المُقاسة وجب التنويه إلى بعض المصطلحات الخاصة بهذا الفحص:

- ✓ نسبة الفولتية المُقاسة للمحول (**Measured Transformer Voltage Ratio** - TVR)، وهي النسبة التي يتم قياسها بواسطة هذا الفحص.
- ✓ نسبة الفولتية الموجودة على لوحة الإسم للمحول (**Transformer Nameplate Voltage Ratio** - TNR)، وهي النسبة المُضمنة في لوحة البيانات للمحول (**Nameplate**).
- ✓ نسبة الفولتية المتوقعة من النسبة الموجودة على لوحة الإسم (**Expected Measured Transformer Voltage Ratio** - $ETVR$)، وهي النسبة التي يتم إحتسابها بالإعتماد على قيمة (**TNR**) الموجودة على لوحة البيانات للمحول (**Nameplate**) وذلك لأغراض المقارنة بالقيمة المُقاسة (**TVR**).
- ✓ نسبة عدد لفات المحول (**Transformer Turns Ratio** - TTR)، وهي النسبة المُستخرجة من الفحوصات السابقة للمحول مثل فحوصات القبول المَصنَعيّة (**FAT**) والمَوقعيّة (**SAT**) أو الفحوصات الروتينية السابقة.

- **مقارنة القيمة المُقاسة (TVR) بالقيمة المثبتة على لوحة البيانات للمحول (TNR)**

في هذا الفحص يتم قياس نسبة الفولتية للمحول (**TVR**) وتكون هذه النسبة مساوية للنسبة الموجودة على لوحة البيانات (**TNR**) للمحولات ذات مجموعات التوصيل (**Dd** أو **Yy**) بحيث يُمكن مقارنة القيمة المُقاسة بالقيمة المُثبتة على لوحة البيانات للمحول (**Nameplate**) مباشرة، أما لباقي مجموعات التوصيل للمحولات مثل (**Dy** أو **Yd** أو **Zig-zag**) فإن قيمة نسبة الفولتية المقاسة (**TVR**) يتم مقارنتها بالنسبة المُتوقعة لنسبة الفولتية (**ETVR**) والتي يتم إحتسابها بواسطة المعادلة التالية وبالإعتماد على نسبة الفولتية الموجودة على لوحة الإسم (**TNR**):

$$ETVR = k * TNR \tag{4.3}$$

حيث:

ETVR : قيمة نسبة الفولتية المُتوقعة للمحول.

TNR : قيمة نسبة الفولتية الموجودة على لوحة الإسم للمحول.

k : معامل يعتمد على توصيلة ملفات المحول ويمكن معرفة قيمته بالإعتماد على الجدول (4-3).

الجدول رقم (4-3)

مجموعة التوصيل	قيمة المعامل K	مجموعة التوصيل	قيمة المعامل K
Dd	1	Yz	√3/2
Dy	√3	YNz	√3/2
Dyn	√3	Yzn	√3
Dz	1.5	YNzn	√3
Dzn	1.5	Zd	1
Yd	√3/2	ZNd	2/3
YNd	1/√3	Zy	√3/2
Yy	1	ZNy	1/√3
YNy	1	Zyn	1
Yyn	1	ZNyn	1
YNyn	1		

مثال: لو أردنا إجراء هذا الفحص على محول ذو مجموعة توصيل (**Dyn1**) وكانت قيمة نسبة الفولتية المُثبتة على لوحة البيانات للمحول (**TNR**) مساوية لـ(**2.1739**) أي على إعتبار أن المحول يقوم بتحويل (**15kv**) إلى (**6.9kv**)، فإن القيمة المتوقع الحصول عليها بإجراء هذا الفحص (**ETVR**) وفقاً للمعادلة والجدول السابقان تكون مساوية لـ(**3.765**). بعد ذلك يتم إجراء هذا الفحص ومقارنة نسبة الفولتية المُقاسة من خلال الفحص (**TVR**) و نسبة الفولتية المتوقعة المحتسبة (**ETVR**).

- **مقارنة القيمة المُقاسة (TVR) بقيمة (TTR) من الفحوصات السابقة**

عند قياس قيمة نسبة الفولتية (**TVR**) لأغلب المحولات فإنها تكون تقريباً مساوية لقيمة نسبة لفات المحول (**TTR**)، ولكن لبعض المحولات يجب حساب قيمة نسبة عدد لفات المحول (TTR_{Cal}) بالإعتماد على قيمة نسبة الفولتية المُقاسة (**TVR**) وذلك ليتسنى لنا مقارنتها بقيمة نسبة عدد اللفات (**TTR**) الموجودة بالفحوصات السابقة مثل فحوصات القبول المَصنعَية (**FAT**) والمَوقعيّة (**SAT**) أوالفحوصات الروتينية وذلك بواسطة المعادلة التالية:

$$TTR_{Cal} = k * TVR \quad (4.4)$$

حيث:

TVR	: قيمة نسبة الفولتية للمحول (القيمة المُقاسة).
TTR_{Cal}	: قيمة نسبة عدد لفات المحول.
k	: معامل يعتمد على توصيلة ملفات المحول ويُمكن معرفة قيمته بالإعتماد على

الجدول (**4-4**).

الجدول رقم (**4-4**)

مجموعة التوصيل	قيمة المعامل K
Dz	3/2
Yzn	1/2
Yd	2/3
YNzn	1/2
Zd	2/3
ZNy	2
Zy	4/3
ZNy	2

مثال: لو أردنا إجراء هذا الفحص على محول ذو مجموعة توصيل (**Yd1**) وكانت قيمة نسبة الفولتية المُقاسة من خلال هذا الفحص (**TVR**) مساوية لـ(**2.5**)، ولغايات مقارنة هذه القيمة بقيمة نسبة عدد لفات المحول (**TTR**) من الفحوصات السابقة لا بُد من إحتساب قيمة نسبة عدد اللفات (TTR_{Cal}) بالإعتماد على قيمة نسبة الفولتية المُقاسة من خلال هذا الفحص (**TVR**) وذلك بتطبيق المعادلة (**4.4**) والرجوع للجدول (**4-4**) حيث أن قيمة نسبة عدد اللفات (TTR_{Cal}) ستساوي (**1.67**) لهذا المحول ذو مجموعة التوصيل (**Yd1**). بعد ذلك يتم مقارنة قيمة نسبة عدد اللفات المحتسبة (TTR_{Cal}) بقيمة نسبة عدد اللفات من الفحوصات السابقة (**TTR**).

7. تحليل نتائج الفحص

بعد تصحيح القِيَم المُقاسة وفقاً لما تم شرحه سابقاً، يتم تحليل نتائج الفحص بعدة طرق كالآتي:

7.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص (**TVR**) بالقيمة الموجودة على لوحة البيانات (**TNR**) المُثبتة على المحول مباشرة أو بعد تصحيحها وإستخراج قيمة نسبة الفولتية المتوقعة (**ETVR**) كما ذُكر سابقاً في فقرة تصحيح القيمة المقاسة.

حيث أن قيمة التباين المسموح بها هي خمسة بالعشرة بالمئة (**0.5%**) كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-1 2011]** والمعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.152-2013]**.

7.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص (**TVR**) بنتائج سابقة للمعدة (**TTR**) (نتائج الفحوصات المَصنعيّة (**FAT**) أو الموقعية (**SAT**) أو الروتينية) وذلك بعد إستخراج قيمة (TTR_{Cal}) بالإعتماد على قيمة نسبة الفولتية المُقاسة (**TVR**) كما ذُكر سابقاً في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة. حيث أن قيمة التباين المسموح بها بعد المقارنة بقيم الفحوصات السابقة هي خمسة بالعشرة بالمئة (**0.5%**).

7.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمعدّة مُشابهة تماماً (**Twin or Sister**).

7.4 الطريقة الرابعة: مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار.

إن هذا الفحص يُمكنه إعطاء مؤشر عن وجود قِصَر أو قطع كُلّي (**Open circuit or Crack**) في الملفات داخل المحول ولكنه لا يقوم بتحديد مكان العطل داخل الملف مما يدفعُنا للإستعانة بفحوصات أُخرى من شأنها الكشف عن حالة المحول الداخلية وقد يصل الأمر إلى فتح الخزان الخاص بالمحول (**De-Tanking**) لمعرفة مكان العطل ومسبباته، كما وتُجدُر الإشارة إلى جدول أوردته بعض المراجع يُساعد على تحديد الملف الذي يَحوي العطل للمحولات ثلاثية الاطوار ذات ثلاث ملفات (**Three Phase Tertiary Windings**) بالإعتماد على نمط مخرجات هذا الفحص.

الجدول رقم (**4-5**)

ملفات تطبيق الفولتية	ملفات قياس الفولتية		التشخيص
	ملف الفولتية المنخفضة الأول LV	ملف الفولتية المنخفضة الثاني TV	
ملف الفولتية المرتفعة HV -	نتيجة فحص (**TVR**) غير مقبولة	نتيجة فحص (**TVR**) مقبولة	إمكانية وجود عطل في ملفات الفولتية المنخفضة الأول - **LV**
ملف الفولتية المرتفعة HV -	نتيجة فحص (**TVR**) مقبولة	نتيجة فحص (**TVR**) غير مقبولة	إمكانية وجود عطل في ملفات الفولتية المنخفضة الثاني - **TV**
ملف الفولتية المرتفعة HV -	نتيجة فحص (**TVR**) غير مقبولة	نتيجة فحص (**TVR**) غير مقبولة	إمكانية وجود عطل في ملفات الفولتية المرتفعة – **HV**

حالة خاصة: في حال كان مُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) مُثبّت على ملفات الفولتية المنخفضة للمحول على غير العادة ونظراً لقلة عدد ملفات الفولتية المنخفضة، فإن بعض الخطوات (**Taps**) قد لا تحمل نفس العدد من اللفات أي أن التغيّر في الفولتية بين الخطوات (**Taps**) غير مُتماثل، و بالتالي فإن النسبة لكل خطوة (**Tap**) قد لا تتوافق بشكل تام مع القيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول أي أن نسبة التباين تجاوزت النسبة المسموح بها وهي خمسة بالعشرة بالمئة (**0.5%**) المُشار إليها سابقاً. لذلك و للتأكد من سلامة المحول نلجأ للحلول التالية في تحليل قيم الفحص:

- ✓ مقارنة القيمة المُقاسة بين الأطوار.
- ✓ حساب قيمة التباين بين نتيجة الفحص للخطوتين (**Taps**) الأعلى و الأدنى فقط على أن لا تزيد عن (**0.5%**) عن قيمة الفحوصات المَصنعيّة (**FAT**) أو المَوقعيّة (**SAT**) أو الروتينية أو القيمة الموجودة على لوحة البيانات للمحول.

8. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

8.1 توصيل الملفات الداخلي للمحول (Winding Configuration)

مجموعة التوصيل للمحول من الأمور التي تؤثر على نتيجة الفحص وتؤدي إلى ظهور نتائج خاطئة في حال عدم أخذها بعين الإعتبار، لذلك بعد الإنتهاء من الفحص يجب مراعاة طريقة توصيل الملفات وذلك لتصحيح القيمة بالشكل الصحيح كإستخراج قيمة الـ(**ETVR**) أو تصحيح قِيَم الفحص المُقاسة و إستخراج قيمة (**TTR**) كما تم شرحه في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة قبل عمل مقارنة بين القراءات السابقة والحالية للفحص أو ما يُسمى بعملية تحليل النتائج.

8.2 التشبُّع العميق للقلب الحديدي (Iron Core deep saturation)

إن القيام بفحوصات المحول التي تعتمد في طبيعتها على تطبيق فولتية أو تيار ثابت على المحول (**DC**) كفحص مقاومة ملفات المحول (**WRM**) وفحص مقاومة العزل (**IR**) من شأنه إحداث تشبُّع في القلب الحديدي للمحول أو ما يُسمى بمغنطة القلب الحديدي، وهذا بدوره يؤدي لزيادة تيار التهييج المار في الملفات عند إجراء فحص نسبة عدد اللفات (**TTR**) ويؤثر على نتيجة الفحص النهائية، ولتجنُّب تأثير تشبُّع القلب الحديدي للمحول على نتيجة هذا الفحص (**TTR**) فإنه يُنصح بالآتي:

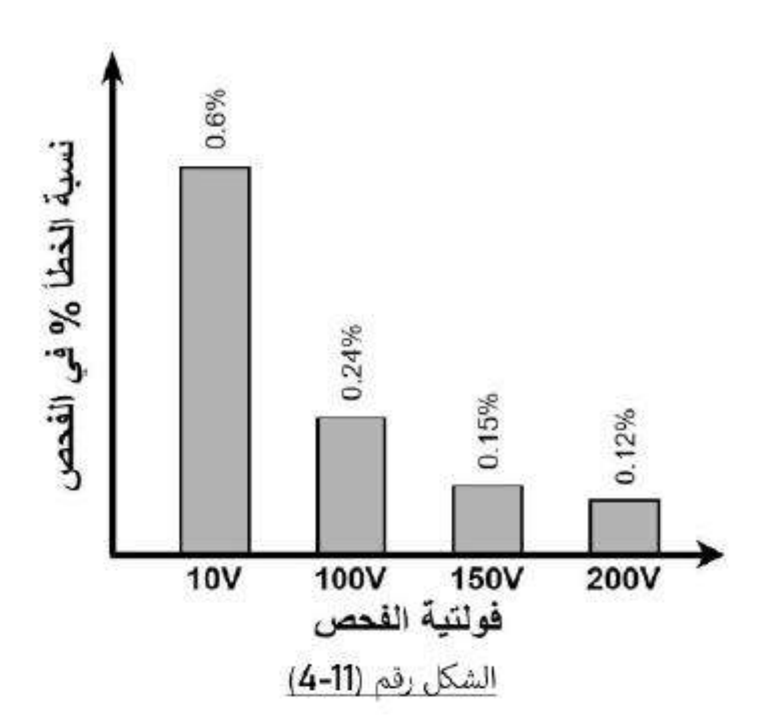
- ✓ عمل الفحوصات التي تؤدي إلى تشبُّع القلب الحديدي بعد فحص نسبة عدد لفات المحول (**TTR**).
- ✓ إزالة مغنطة القلب الحديدي (**De-magnetization**) بعد الإنتهاء من فحوصات التيار أو الفولتية الثابتة (**DC**) وقبل البدء بفحص نسبة عدد اللفات (**TTR**) بإحدى الطرق المذكورة في الفصول السابقة.

8.3 التوصيل الخاطىء لأطراف قياس الفولتية (Wrong connection)

هذه النوع من الأخطاء غالباً ما يحدث عند وصل جهاز قياس الفولتية على أطراف ملفات المحول الثانوية غير المشحونة بدلاً من الملفات المشحونة عند عمل الفحص لكل طور على حدا (**Per phase measurements**)، لذلك يجب تحديد أطراف المحول التي يجب تطبيق الفولتية عليها والأطراف التي يجب قياس الفولتية عليها مسبقاً قبل البدء بالفحص وذلك بالإعتماد على الجداول في الملحق رقم (**4-3**) وفقاً لمجموعة التوصيل الخاصة بالمحول تحت الفحص.

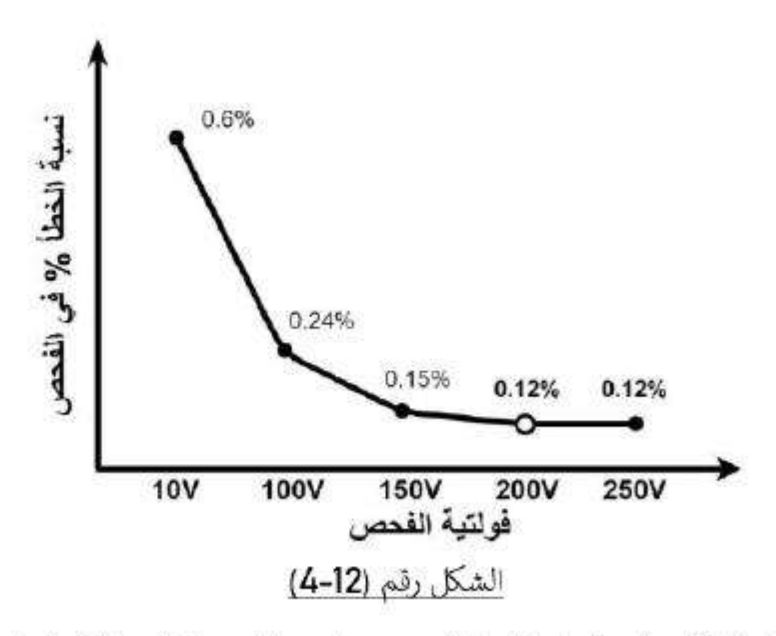
8.4 فولتية الفحص أو كما تُسمى التهييج (Excitation voltage)

إن الفولتية المُتولدة على أطراف الملفات الثانوية نتيجة للفولتية المُطبقة على الملفات الإبتدائية تتناسب طردياً مع كمية الفيض المشترك بين الملفات (**Mutual Flux**)، ولزيادة قيمة هذا الفيض المشترك يجب زيادة قيمة فولتية الفحص (التهييج)، حيث أنه وبالإعتماد على ما ذُكر سابقاً فإن نسبة الخطأ في قيمة نسبة فولتية المحول (**TVR**) تتناسب عكسياً مع قيمة فولتية الفحص (التهييج) كما هو مُبين بالرسم البياني الموضح في الشكل (**4-11**) لمحول بالمواصفات التالية (**Dyn1 15/6.9kv**):



الشكل رقم (**4-11**)

ولكل محول هنالك قيمة فولتية عتبة (**threshold**) لفولتية الفحص (التهييج)، عندها تكون نسبة الخطأ في قيمة الفحص أقل ما يُمكن **وبدأت بالثبات** كما هو مُبين بالشكل (**4-12**) لمحول بالمواصفات التالية (**Dyn1 20/6.9kV**) حيث قيمة فولتية العتبة هي تقريباً (**200 V**).



الشكل رقم (4-12)

مما سبق يُمكن ملاحظة أثر زيادة قيمة فولتية الفحص على تقليل نسبة الخطأ في القياس، لذلك لا يُنصح بإجراء هذا الفحص بإستخدام فولتيات متدنية.

8.5 طريقة الفحص ثلاثية الطور (Three Phase testing) أو آحادية الطور (Single Phase testing)

من الشائع عند القيام بهذا الفحص إستخدام مصدر آحادي الطور (**Single Phase Source**) بحيث يتم القياس لكل طور على حدا، ولكن عند القيام بهذه الطريقة يُمكن مواجهة التحديات التالية:

- ✓ تأثير مقدار فولتية الفحص (**Excitation test voltage**) على نتيجة الفحص، حيث أنه كلما قلت فولتية الفحص كلما زادت نسبة الخطأ، أما في حال إستخدام الطريقة ثلاثية الطور (**Three phase testing**) فإن تأثير مستوى فولتية الفحص على نسبة الخطأ يقل.
- ✓ تأثير خسائر التهييج (**Excitation Loss**) على نتيجة الفحص.
- ✓ ضعف الفيض المشترك بين الملفات الإبتدائية والثانوية مما يؤثر على نتيجة الفحص.

و للتقليل من تأثير هذه المعوّقات يتم اللجوء إلى الحلول التالية:

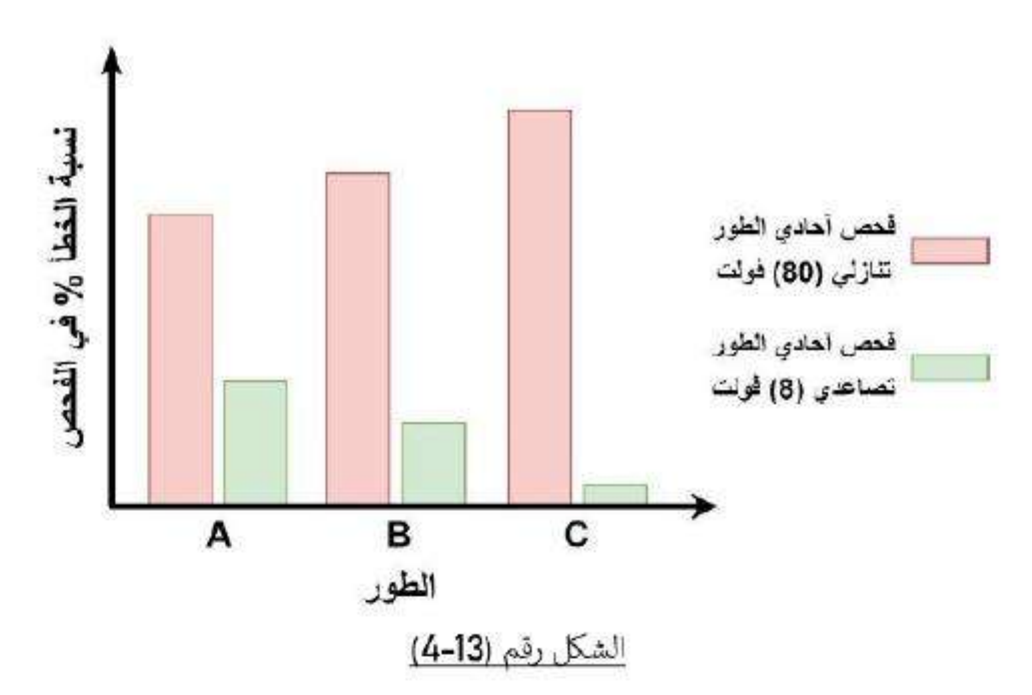
- ✓ رفع قيمة فولتية الفحص أو ما يُسمى بفولتية التهييج (**Excitation test voltage**).
- ✓ إستخدام أسلوب الفحص (**Step-Up**)، أي تطبيق فولتية الفحص على جهة ملفات الفولتية المنخفضة (**LV windings**) والقياس جهة ملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**).
- ✓ حقن الفولتية بين (**Line to Line**) عوضاً عن (**Line to Neutral**).
- ✓ الفحص بالطريقة ثلاثية الطور (**Three Phase Testing**) أي بإستخدام مصدر فولتية ثلاثي الطور.

8.6 توصيلة الملفات على شكل مثلث – Delta Connected Winding

عند إجراء فحص نسبة عدد اللفات (**TTR**) وكما تم شرحه مسبقاً في فقرة فلسفة الفحص فإن المحول يكون مفتوح الأطراف (**Open circuit**) أثناء الفحص أي أنه غير مرتبط بحمل على دائرته الثانوية (**No-Load**) لأسباب تم ذِكرها أيضاً، ولكن في حال أردنا فحص محول وكانت ملفاته الثانوية موصولة على شكل مثلث فإنه في هذه الحالة ونظراً للدائرة المغلقة للملفات الثانوية (**Delta connection**) فإن ذلك من شأنه عمل حمل على الملفات الثانوية كما وأنها غير مفتوحة الأطراف وظهور تيارات دوّارة (**Circulating currents**) مما يزيد قيمة الضياعات ويؤثر على نتيجة هذا الفحص (**TTR test**).

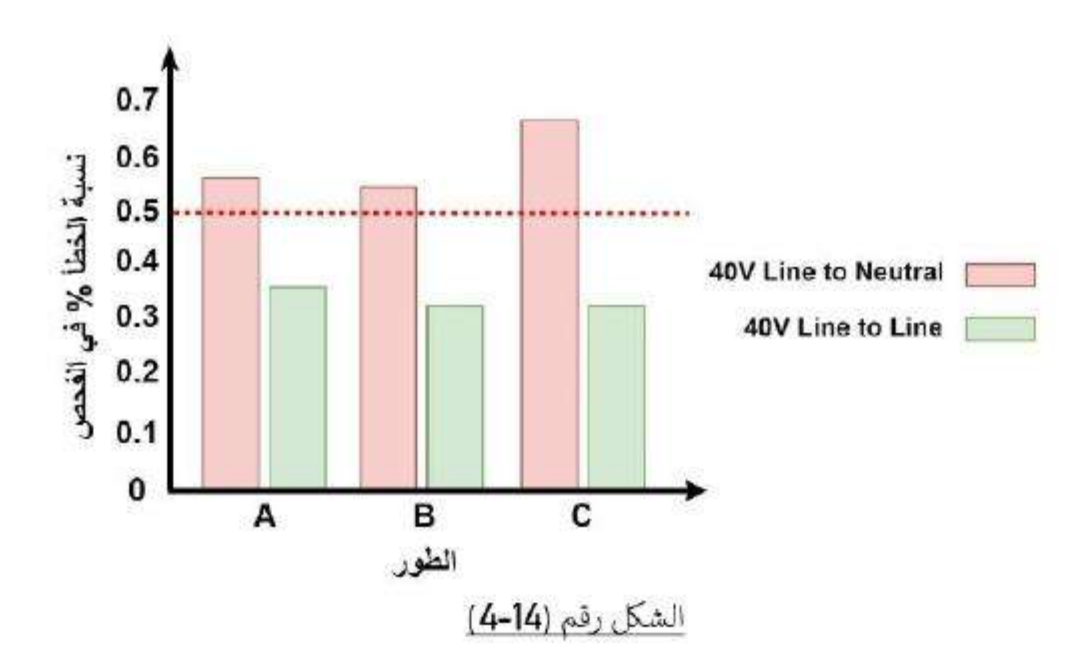
لذلك وللتخلُّص من تأثير الملفات الثانوية الموصولة على شكل مثلث (**Delta**) فإنه يُنصح بالآتي:

- ✓ إستخدام أسلوب الفحص التصاعدي (**Step-Up**)، أي تطبيق فولتية الفحص على جهة ملفات الفولتية المنخفضة (**LV windings**) الموصولة على شكل مثلث (**Delta**) والقياس جهة ملفات الفولتية المرتفعة (**HV winding**). ويُبين الشكل (**4-13**) تأثير أسلوب الفحص فيما إذا كان تصاعدي أو تنازلي على نسبة الخطأ في الفحص.



الشكل رقم (4-13)

- ✓ الفحص بالطريقة ثلاثية الطور (**Three Phase Testing**) أي بإستخدام مصدر فولتية ثلاثي الطور.
- ✓ حقن الفولتية بين (**Line to Line**) عوضاً عن (**Line to Neutral**). ويُبين الشكل (**4-14**) تأثير حقن الفولتية بين الأطوار أو بين الطور ونقطة التعادل على نسبة الخطأ في الفحص.



الشكل رقم (4-14)

8.7 تأريض طرف حقن الفولتية

عند تطبيق هذا الفحص بإستخدام مصدر فولتية مترددة آحادي الطور يجب تأريض طرف نقطة التعادل (**Neutral point**) كما هو مُبين في توصيلة الفحص الموضحة في الشكل (**4-8**).

9. فحوصات إضافية داعِمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص وتحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص نسبة عدد اللفات (**TTR**) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية، لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأُخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية فهنالك عدة فحوصات من شأنها الكشف عن وجود قطع أو قِصَر بين ملفات المحول بحساسية تفوق نظيرتها لهذا الفحص حيث يمكن الإستعانة بفحص تيار التهييج (**Excitation current**) للكشف عن وجود قِصَر بين لفات المحول، وكذلك يُمكن الإستعانة بفحص مقاومة الملفات (**Winding resistance**) للكشف عن وجود قطع كُلي أو جزئي في ملفات المحول، وأيضاً فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (**Sweep frequency response analysis SFRA**) للكشف عن حالتي القطع والقِصَر بين الملفات بالإضافة لأعطال القلب الحديدي للمحول (**Iron Core**).

10. أمثلة على نتائج فحوصات مَصنعيّة

10.1 المثال الأول: الشكل (**4-15**) يُبين قِيَم فحص نسبة الفولتية (**TVR**) مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three Phase Two Windings**) موصول بطريقة (**YNd11**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**DETC or OCTC**).

Acceptance
Test Certificates

Customer :	MEASUREMENT OF VOLTAGE RATIO AND CHECK OF VECTOR GROUP	Page No :
		Serial No.:
	Standard : IEC 60076-1 § 10.3	Report No.:
Rated Power(MVA): 10.6 / 135	Rated Voltage(kV): 420 / 15	Vector Group: YNd11

Winding pair : HV / LV   Check of Vector Group : YNd11 ✓

Tap No HV	Tap No LV	Calculated Ratio	Measured H1H0 / X1X3	Error (%)	Measured H2H0 / X2X1	Error (%)	Measured H3H0 / X3X2	Error (%)
1	-	16,944	17,011	0.39	17,023	0.46	17,015	0.42
2	-	16,023	16,677	0.32	16,690	0.40	16,712	0.49
3	-	16,156	16,210	0.33	16,219	0.39	16,214	0.36
4	-	15,811	15,876	0.40	15,887	0.47	15,877	0.42
5	-	15,401	15,456	0.36	15,471	0.45	15,465	0.41

الشكل رقم (**4-15**)

10.2 المثال الثاني: الشكل (**4-16**) يُبين قِيَم فحص نسبة الفولتية (**TVR**) مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three Phase Two Windings**) موصول بطريقة (**Dyn1**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**OLTC**).

Acceptance
Test Certificates
AREVA

Customer :	MEASUREMENT OF VOLTAGE RATIO AND CHECK OF VECTOR GROUP	Page No :
		Serial No.:
	Standard : IEC 60076-1 § 10.3	Report No.:
Rated Power(MVA): 24 / 30	Rated Voltage(kV): 15 / 6,9	Vector Group: Dyn1

Winding pair : HV / LV   Check of Vector Group : Dyn1 ✓

Tap No HV	Tap No LV	Calculated Ratio	Measured H1H2 / X2X0	Error (%)	Measured H2H3 / X3X0	Error (%)	Measured H3H1 / X1X0	Error (%)
1	-	5.122	5.133	0.21	5.133	0.21	5.133	0.21
2	-	5.065	5.073	0.16	5.073	0.16	5.073	0.16
3	-	5.002	5.010	0.16	5.010	0.16	5.010	0.16
4	-	4.943	4.943	0.00	4.943	0.00	4.943	0.00
5	-	5.883	5.889	0.12	5.889	0.12	5.889	0.12
6	-	4.822	4.833	0.23	4.833	0.23	4.833	0.23
7	-	4.767	4.774	0.15	4.774	0.15	4.774	0.15
8	-	4.701	4.715	0.30	4.715	0.30	4.715	0.30
9	-	4.637	4.645	0.17	4.645	0.17	4.645	0.17
10	-	4.575	4.580	0.11	4.580	0.11	4.580	0.11
11	-	4.510	4.508	-0.04	4.508	-0.04	4.508	-0.04
12	-	4.463	4.471	0.18	4.471	0.18	4.471	0.18
13	-	4.402	4.400	-0.05	4.400	-0.05	4.400	-0.05
14	-	4.340	4.346	0.14	4.346	0.14	4.346	0.14
15	-	4.280	4.289	0.21	4.299	0.21	4.289	0.21
16	-	4.220	4.223	0.07	4.223	0.07	4.223	0.07
17	-	4.160	4.172	0.29	4.172	0.29	4.172	0.29

الشكل رقم (**4-16**)

10.3 المثال الثاني: الشكل **(4-17)** يُبين قِيَم فحص نسبة الفولتية **(TVR)** مَصنعي **(FAT)** لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات **(Three Phase Tertiary Windings)** موصول بطريقة **(Dd0-d0)** ذو مُغيّر خطوة من نوع **(OCTC** أو **DETC)**.

Measurement of voltage ratio and check of phase displacement

1、HV-LV1 voltage ratio measurement

Tapping	HV (V)	LV (V)	Voltage ratio error (%)		
			U_{AB}/U_{a1b1}	U_{BC}/U_{b1c1}	U_{CA}/U_{c1a1}
1	21000	11500	0.28	0.23	0.28
2	20500		0.19	0.17	0.21
3	20000		0.20	0.19	0.20
4	19500		0.06	0.03	0.06
5	19000		0.04	0.03	0.05

2、Check of phase displacement of- HV-LV1: Dd0

3、HV-LV2 voltage ratio measurement

Tapping	HV (V)	LV2 (V)	Voltage ratio error (%)		
			U_{AB}/U_{a2b2}	U_{BC}/U_{b2c2}	U_{CA}/U_{c2a2}
1	21000	11500	0.29	0.28	0.30
2	20500		0.23	0.21	0.22
3	20000		0.16	0.14	0.16
4	19500		0.06	0.04	0.05
5	19000		0.02	0.03	0.03

4、Check of phase displacement of- HV-LV2: Dd0

5、LV1-LV2 voltage ratio measurement

Tapping	LV1 (V)	LV2 (V)	Voltage ratio error (%)		
			U_{a1b1}/U_{a2b2}	U_{b1c1}/U_{b2c2}	U_{c1a1}/U_{c2a2}
/	11500	11500	0.06	0.04	0.08

6、Check of phase displacement of- LV1-LV2: dd0

Test results	Measured values meet the relevant requirements

الشكل رقم **(4-17)**

الملحق (1-4)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص نسبة عدد لفات المحول بإستخدام جهاز TESTRANO 600 by OMICRON





الشكل رقم (1-1-4)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(TESTRANO600 Brochure)
  - فولتية المدخل الإسمية : 100/240 V, 50/60 Hz
  - فولتية المدخل المسموح بها : 85-264 V, 45-65 Hz
  - نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

عدد الأطوار	نطاق الفولتية (AC)	التيار الأقصى (AC)
ثلاثي الأطوار	0 ... 230 V	100 mA
	0 ... 80 V	16 A
	0 ... 40 V	33 A
آحادي الطور	0 ... 240 V	16 A
	0 ... 120 V	33 A

- دقة النطاق المُقاس : حسب الجدول التالي.

دقة القراءات	النطاق
0.03% rd + 0.043% range	1:1 10
0.027% rd + 0.043% range	1:10 100
0.027% rd + 0.043% range	1:100 1000
0.027% rd + 0.043% range	1:1000 10000

- البيئة التشغيلية المحيطة : 14° F to 131° F (-10° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
- أبعاد الجهاز : 580 x 386 x 229 mm
- وزن الجهاز : 45.5 lb. (20.6 kg), with display

- **خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:**

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**5.1** إلى **5.5**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص نسبة عدد اللفات.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مبين بالأشكال (**4-1-2&3**).



الشكل رقم (4-1-2)



الشكل رقم (4-1-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:

7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.

7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.

7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.

7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.

7.5 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خَطِر.

8. إحضار جهاز الفحص (**TESTRANO 600**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**55°**) درجة مئوية، وفي حال كانت الحرارة أكثر من (**40°**) درجة مئوية يجب الرجوع للكتيب التفصيلي (**Manual**) الخاص بجهاز الفحص لمعرفة التيار الأقصى الذي يُمكن حقنه من خلال الجهاز، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.

9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (**3**) في الشكل (**4-1-2**) على وضعية (**OFF - 0**) الموضحة على المفتاح.

10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (**Emergency Push Button**) رقم (**15**) في الشكل (**4-1-3**).

11. وصل جهاز الفحص بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض رقم (**1**) في الشكل (**4-1-2**) بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنّعة أو بواسطة كيبل تأريض لا يقل مساحة مقطعه العرضي عن ($6\ mm^2$) ملي متر مربع أقرب ما يُمكن على مُشغل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (**Impedance**) قدر المستطاع.

12. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (**Low Impedance**).

13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمُعاوقة قليلة (**Low Impedance**).

14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (**2**) في الشكل (**4-1-2**) بحيث يتم وصل كيبل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.

15. تشغيل الجهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم (**3**) في الشكل (**4-1-2**) عن طريق تغير وضعيته من (**O**) إلى (**I**) الموضحة على المفتاح.

16. ملاحظة إنار كل من لمبة الإشارة خضراء اللون رقم (**18**) والحلقة الزرقاء حول زر بدء/إيقاف الفحص (**Start/Stop**) في الشكل (**4-1-3**)، وهذا يعني أن الجهاز لا يحقن تيار ولا فولتية كما يظهر في الشكل (**4-1-4**).



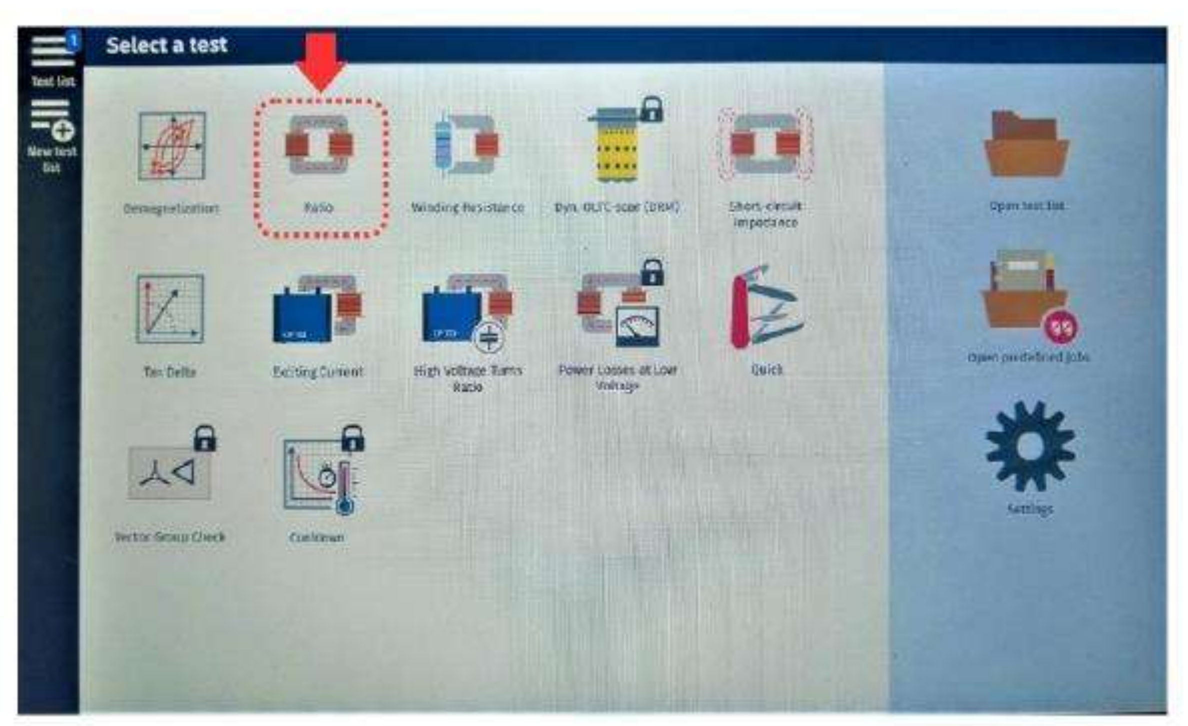
الشكل رقم (**4-1-4**)

17. في حال كان هنالك مشكلة ما في التأريض سوف تظهر رسالة على الشاشة تُفيد بذلك وستظهر العلامة التالية أسفل الشاشة ، وفي حال عدم إنارة أي ضوء تحذيري أو ظهور أية رسائل تحذيرية على الشاشة فإن ذلك يعني أن الأرضي والجهاز سليمين والجهاز مُهيأ لعمل باقي التوصيلات والبدء بالفحص.



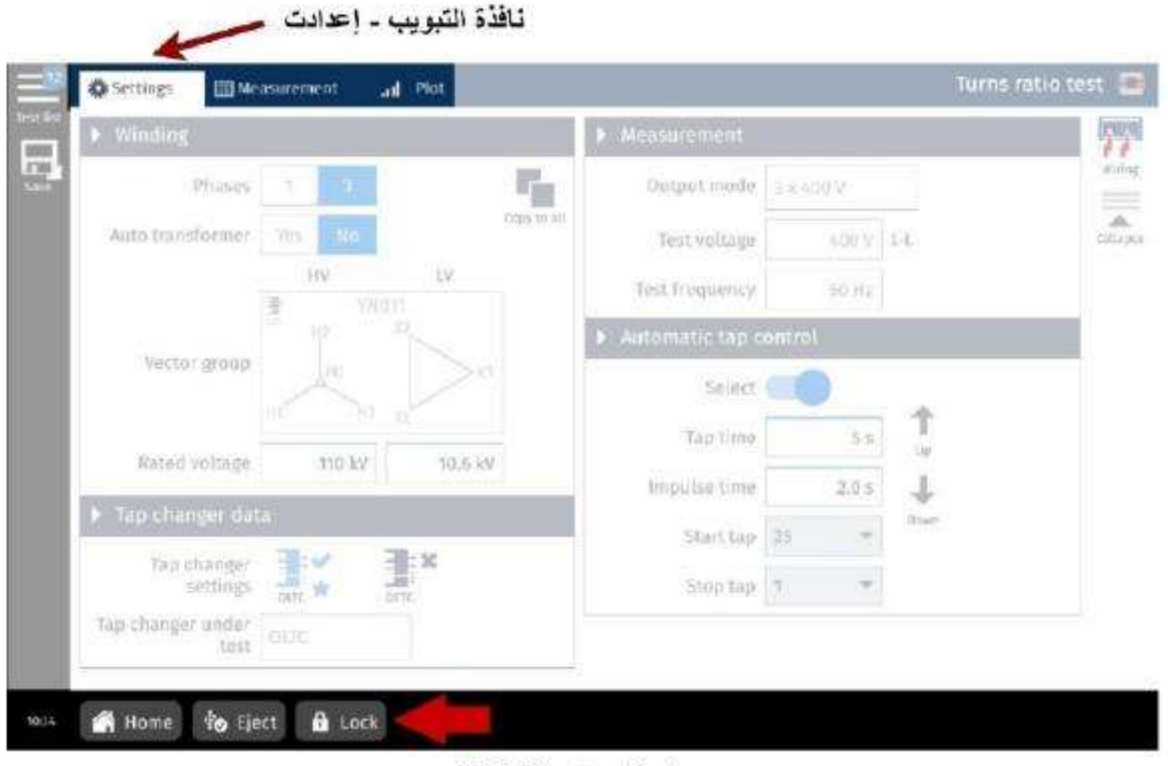
ملحوظة: يُتيح جهاز الفحص (**TESTRANO 600**) إمكانية ضبط إعدادات الفحص وإجراؤه بطريقتين، الطريقة الأولى بواسطة شاشة اللمس (**Touch Control**) مباشرة والطريقة الثانية بواسطة توصيل جهاز الحاسوب بجهاز الفحص (**TESTRANO 600**) والقيام بالفحص عبر برنامج (**Primary Test Manger - PTM**). حيث سيتم التطرق للطريقة الأولى فقط في هذا الملحق.

18. إختيار فحص نسبة اللفات/الفولتية (**Ratio**) من القائمة الرئيسية الظاهرة على شاشة اللمس (**Touch Control**) والمُبينة في الشكل (**4-1-5**).



الشكل رقم (**4-1-5**)

19. بعد ذلك تظهر الشاشة المُبينة في الشكل (**4-1-6**) وتكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (**Settings**). نقوم بعمل قفل (**Software Lock**) للحفاظ على الوضعية الآمنة أثناء عمل التوصيلة المناسبة للفحص، وذلك بالضغط على زر القفل الظاهر أسفل الشاشة 🔒 كما هو مُبين في الشكل (**4-1-6**).



الشكل رقم (**4-1-6**)

20. بعد الضغط على زر القفل (**Lock**) المبين في الشكل السابق تظهر النافذة الفرعية المُبينة في الشكل (**4-1-7**)، ثم نقوم بإدخال كود رباعي والضغط على كلمة (**Lock**). وبذلك نكون قد وصلنا للوضعية الآمنة للجهاز.



الشكل رقم (**4-1-7**)

21. توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (**4-1-8**) بجهاز الفحص عبر المنافذ المبينة في الشكل (**4-1-2**) كالآتي:

21.1 توصيل كيبل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (**4**) المُبين في الشكل (**4-1-2**).

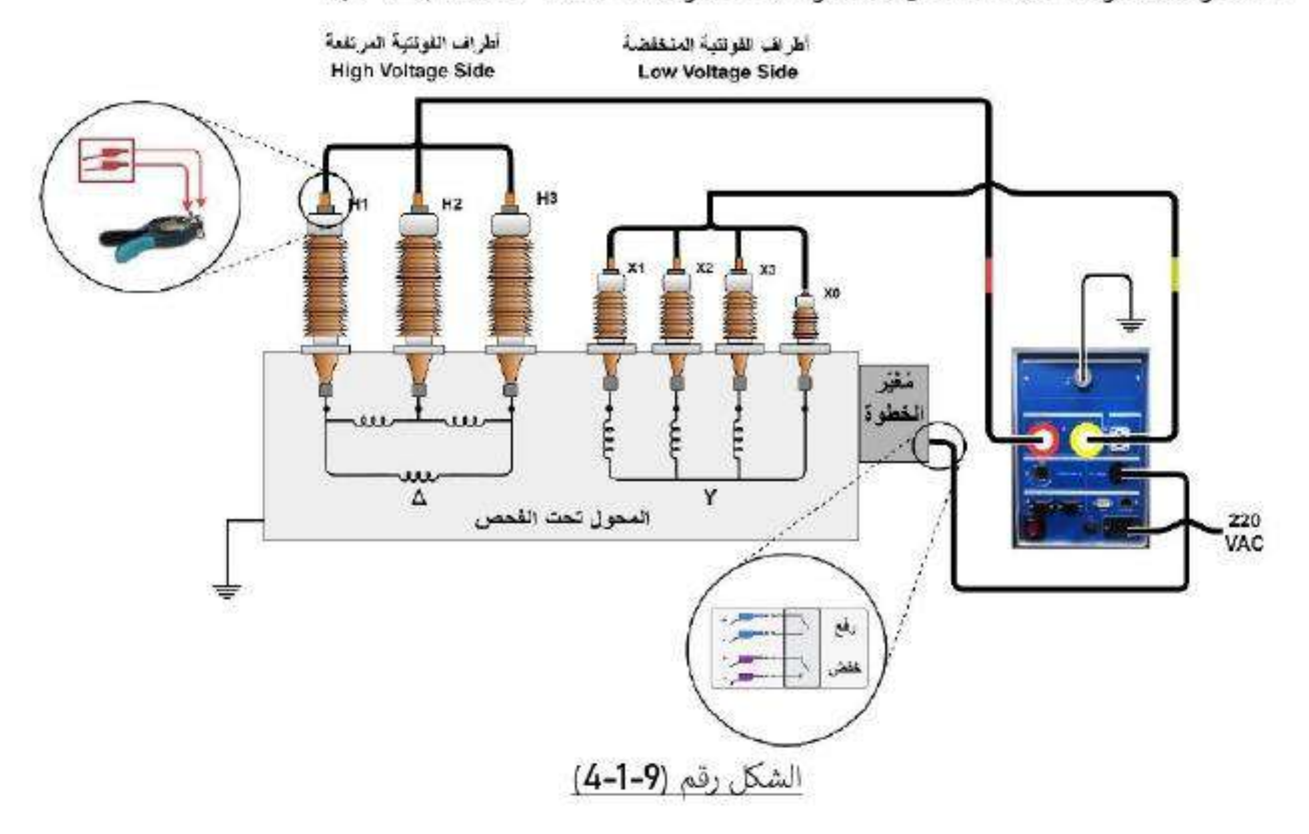
21.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة (الأصفر) بالمنفذ رقم (**9**) المُبين في الشكل (**4-1-2**).

21.3 توصيل كيبل مُغيّر الخطوة (الأسود) بالمنفذ رقم (**7**) المُبين في الشكل (**4-1-2**).



الشكل رقم (**4-1-8**)

22. توصيل كوابل جهاز الفحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المُبينة بالشكل (4-1-9).



الشكل رقم (4-1-9)

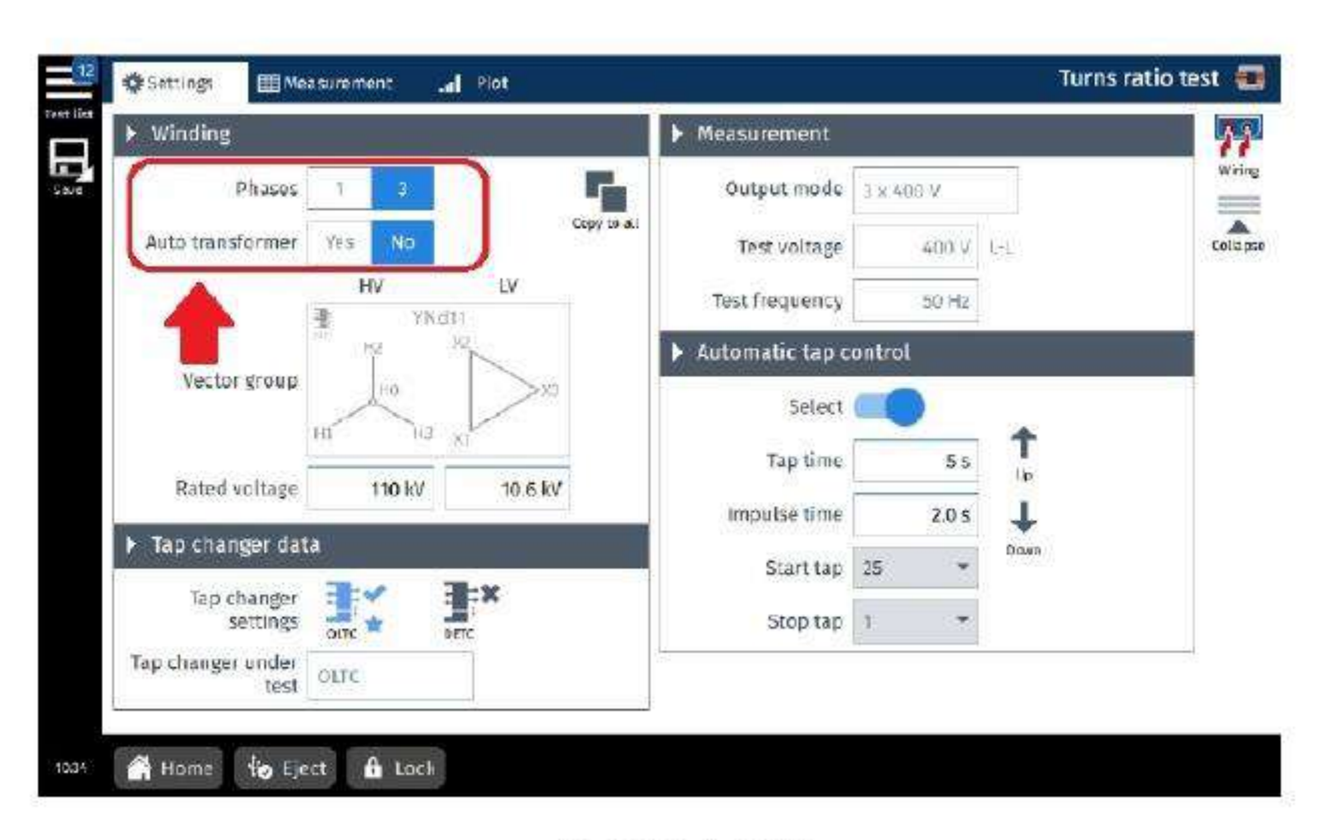
23. إرجاع الطاقة الكهربائية لمُغيّر الخطوة (**Tap-changer**) فيما إذا كانت مفصولة.

24. التأكد من نصب حواجز السلامة بالإضافة للشواخص التحذيرية.

25. بعد الإنتهاء من التوصيلة كاملة، نقوم بتحرير (**Release**) زر إيقاف الفحص في حالة الطوارئ (Emergency Stop Button).

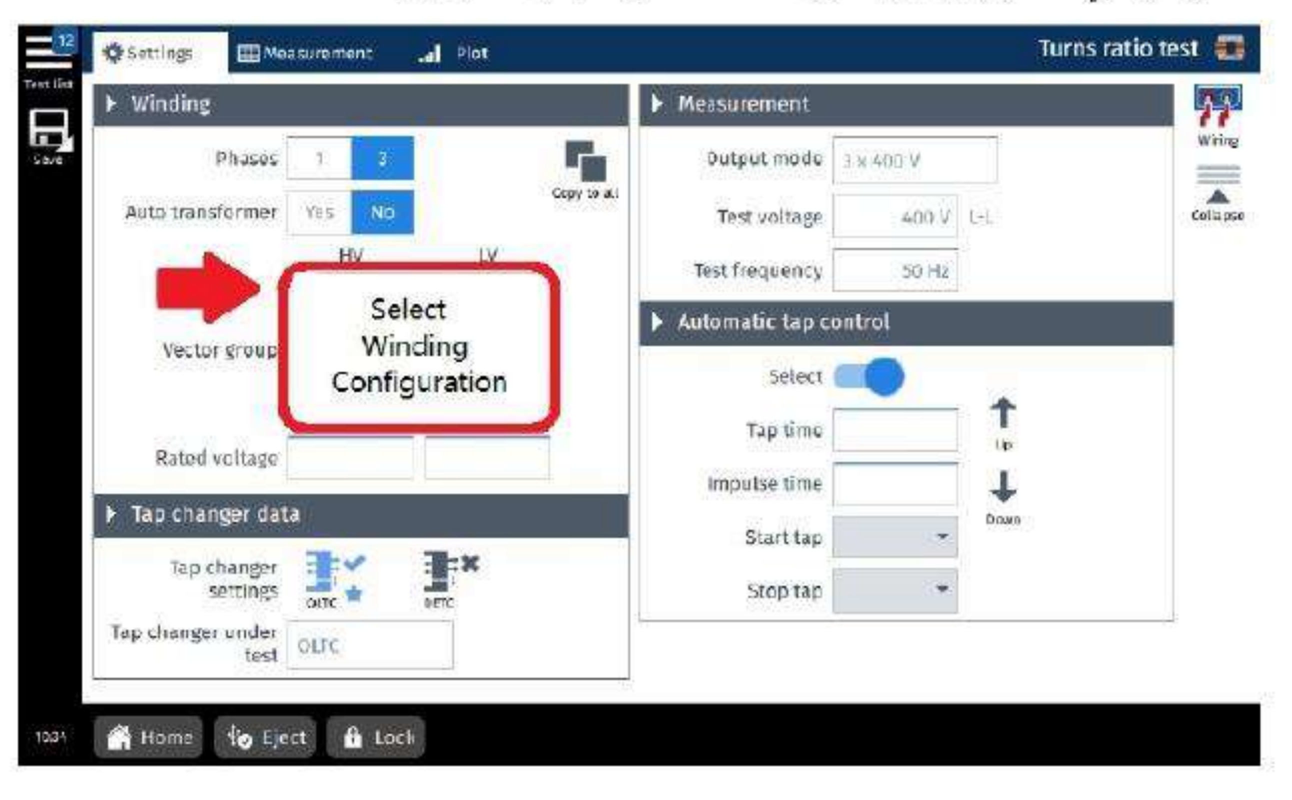
26. الرجوع لشاشة اللمس وإزالة قفل الشاشة عبر إدخال الكود الرباعي و الضغط على أيقونة الإدخال ↵ ويُمكن كذلك إزالة قفل الشاشة عبر إطفاء الجهاز وتشغيله مره آخرى.

27. من الشاشة الظاهرة في الشكل (**4-1-10**) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (**Settings**) يتم تحديد عدد أطوار المحول المُراد فحصه بالضغط على الرقم (**3**) أي أنه ثلاثي الطور (**3 phase transformer**)، ثم يتم الضغط على (**No**) بجانب المحول التلقائي (**Auto** Transformer).



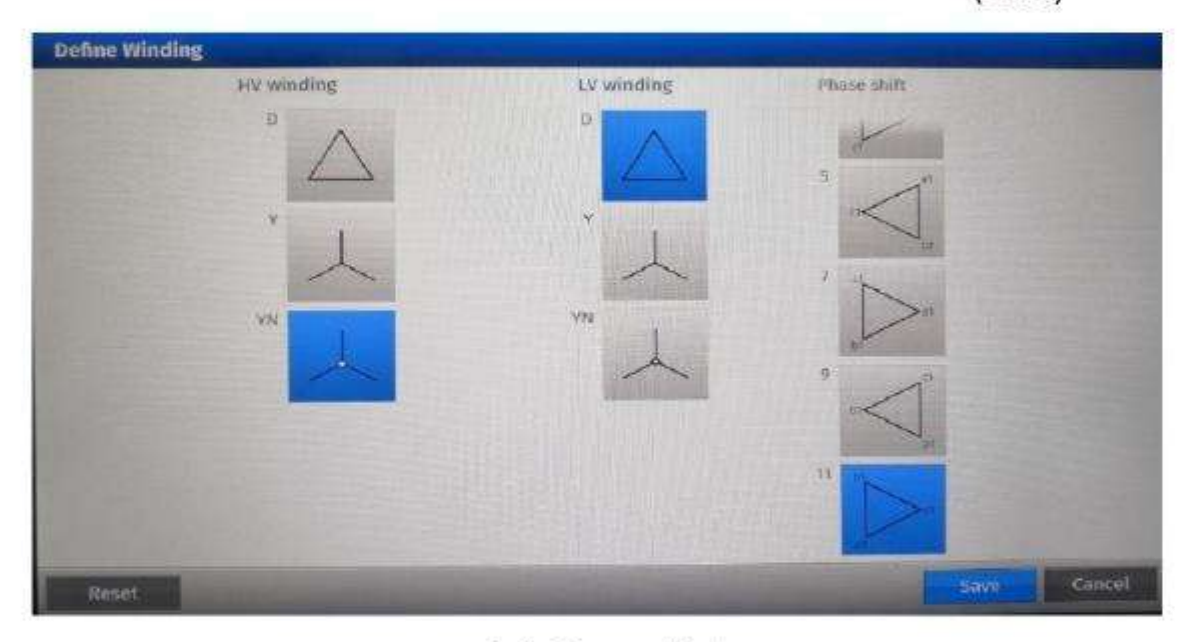
الشكل رقم (4-1-10)

28. نقوم بتحديد مجموعة التوصيل **(Vector group)** الخاصة بالمحول المُراد فحصه وذلك بالضغط على جملة إختر مجموعة التوصيل **(Select winding configuration)** الظاهرة على الشاشة والمُبينة في الشكل **(4-1-11)** لتظهر لنا شاشة تحديد مجموعة التوصيل.



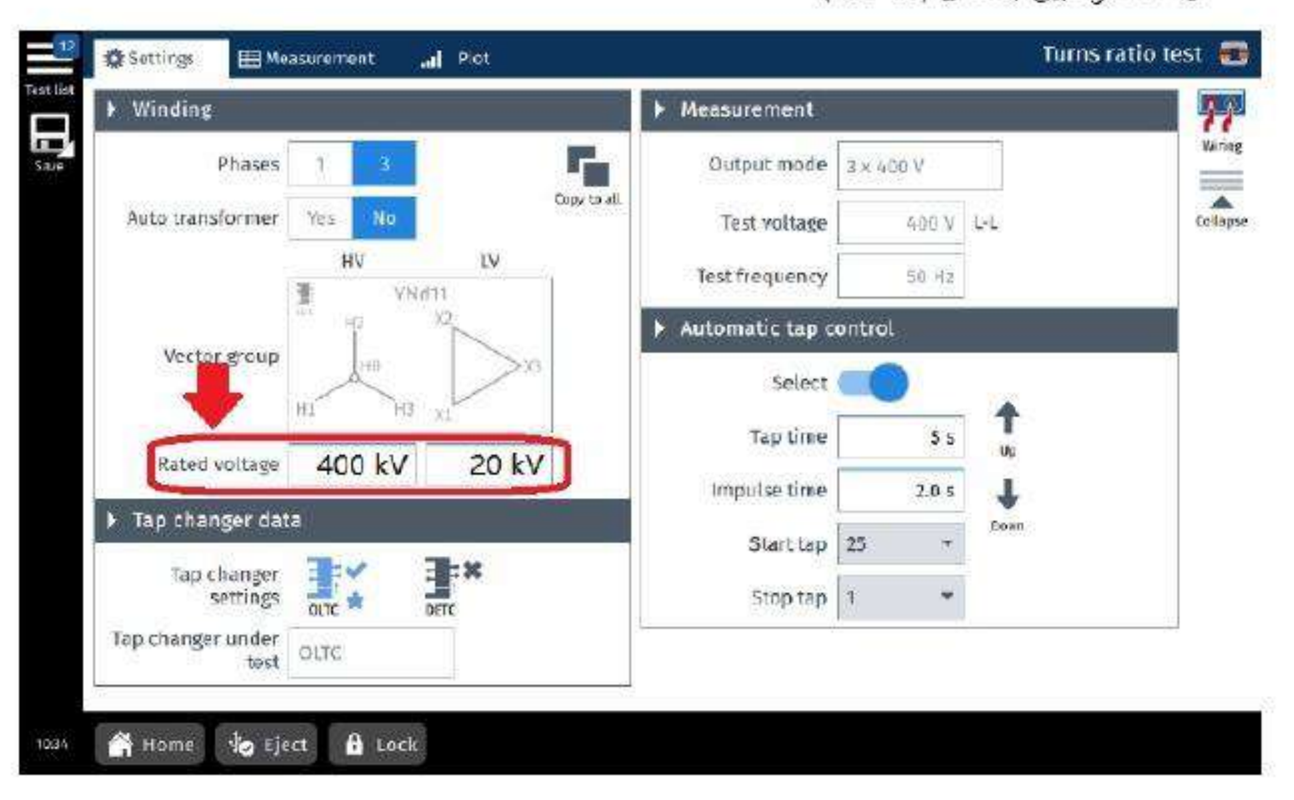
الشكل رقم (4-1-11)

29. من شاشة تحديد مجموعة التوصيل الظاهرة في الشكل **(4-1-12)** نقوم بتحديد مجموعة التوصيل الخاصة بالمحول المُراد فحصه، حيث تم تحديد المجموعة **(YNd11)** كمثال ثم الضغط على زر حفظ **(Save)**.



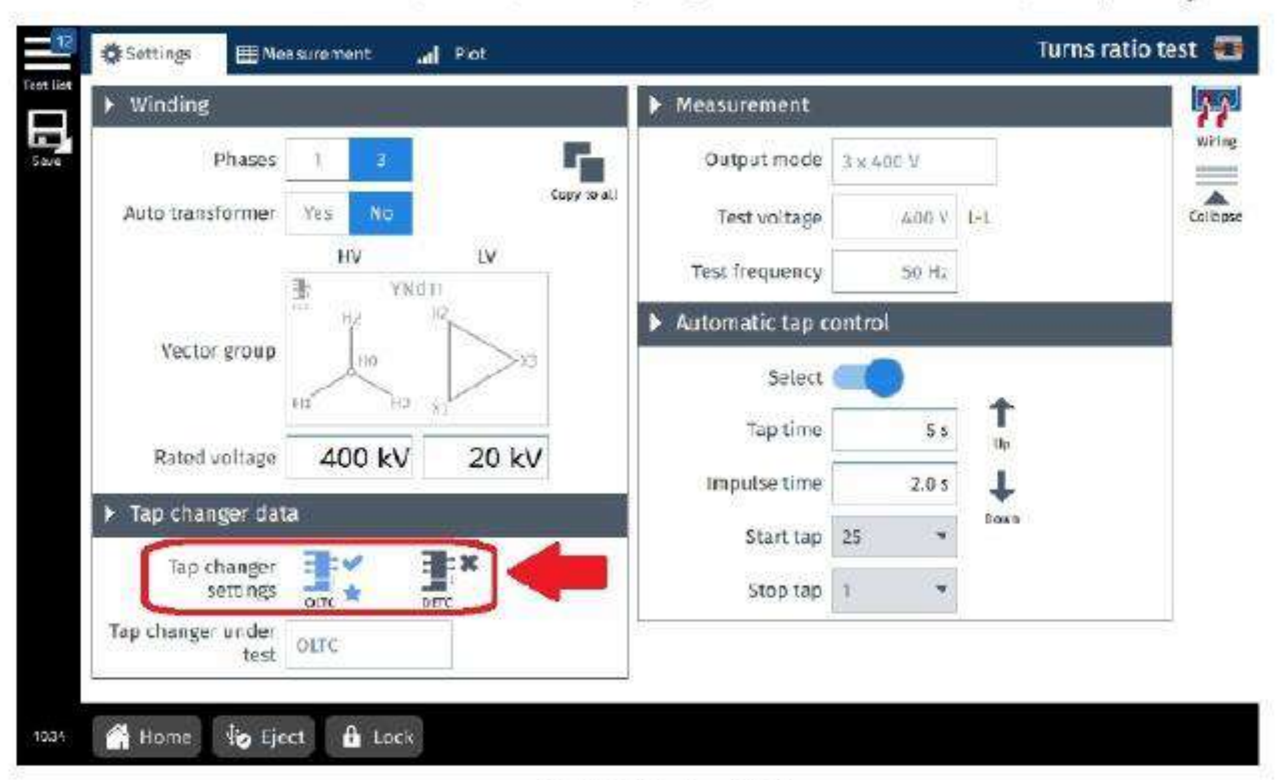
الشكل رقم (4-4-12)

30. تحديد الفولتية الإسمية للمحول المُراد فحصه وذلك بإدخال قيمة هذه الفولتية بالمكان المخصص لها كما هو مُبين بالشكل **(4-1-13)**.



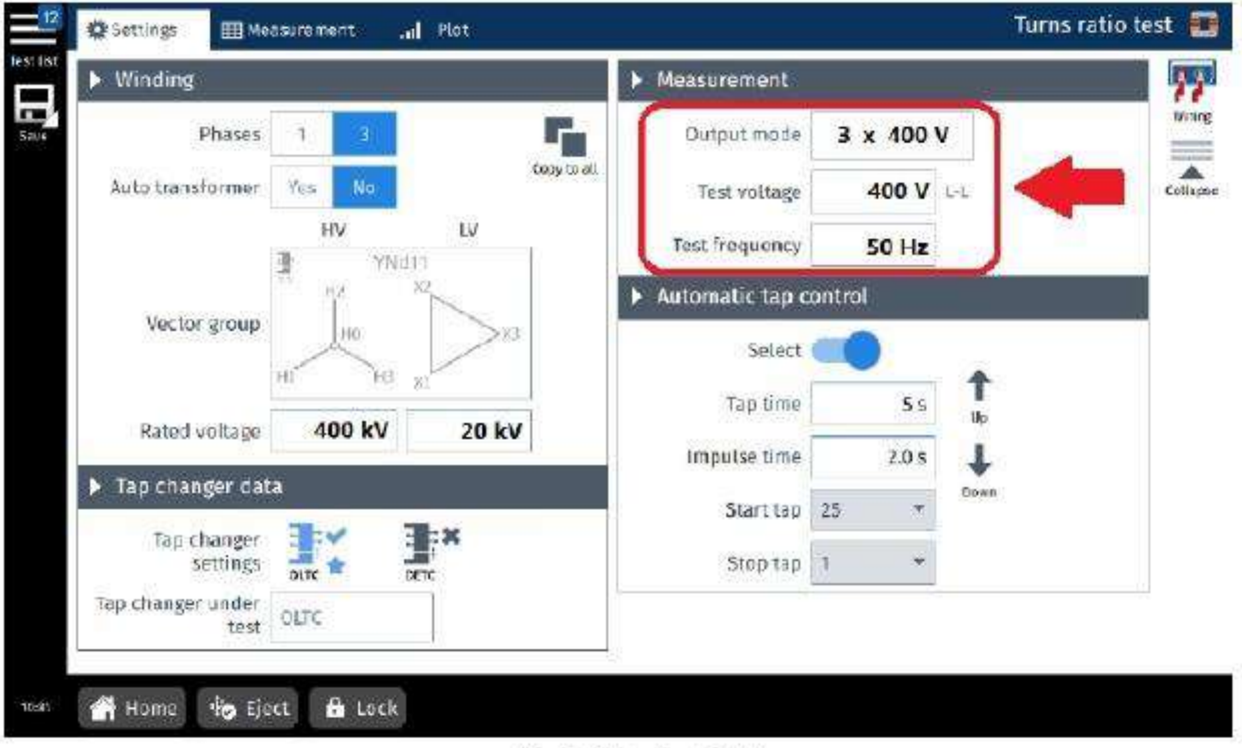
الشكل رقم (4-1-13)

31. تحديد نوع مُغيّر الخطوة (**Tap Changer**) فيما إذا كان (**OLTC** أو **DETC**)، وفي حالتنا هذه نقوم بإختيار (**OLTC**) وذلك بالضغط عليها كما هو مُبين بالشكل (**4-1-14**).



الشكل رقم (**4-1-14**)

32. تحديد نمط فولتية المخرج (**Output mode**) بالضغط على (**3 phases**) وذلك لتفعيل الفحص بالنمط ثلاثي الطور، وكذلك تحديد فولتية وتردد الفحص كما هو مُبين في الشكل (**4-1-15**).



الشكل رقم (**4-1-15**)

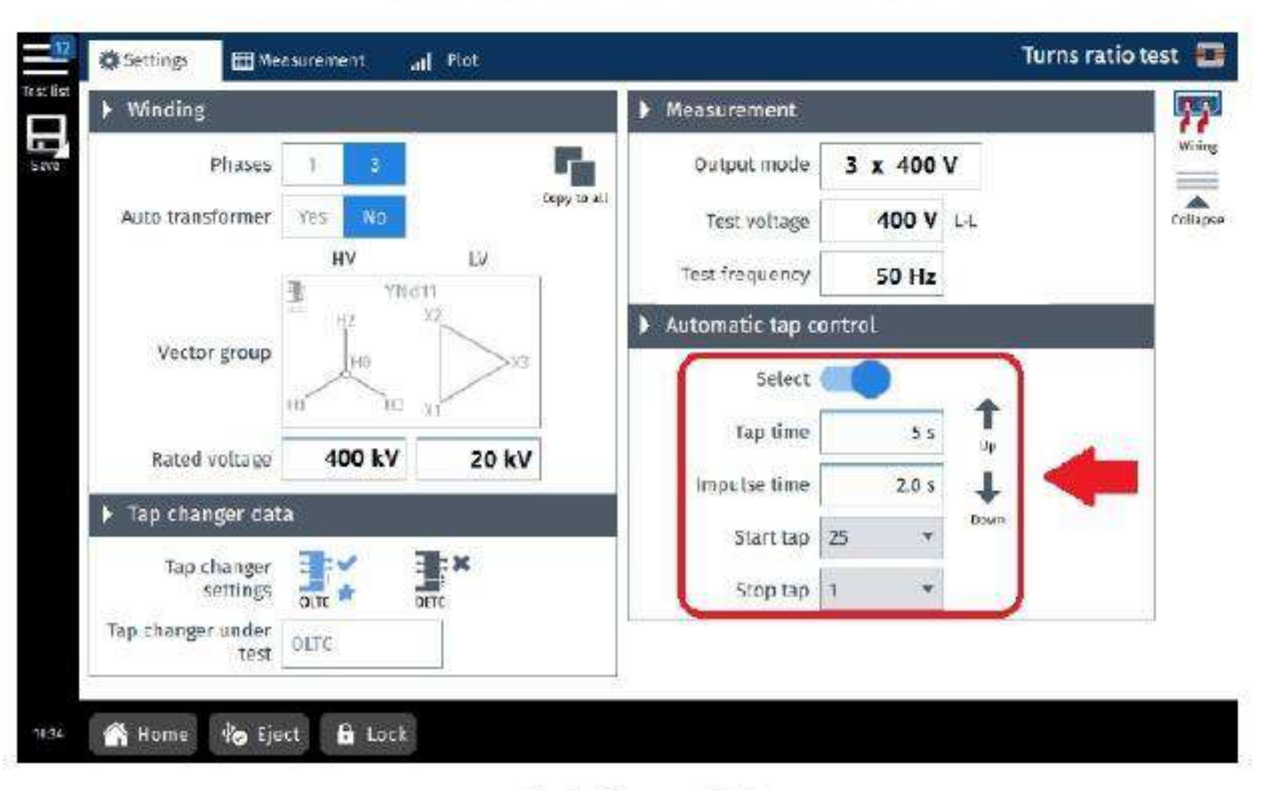
33. ضبط إعدادات مُغيّر الخطوة (**Tap Changer**) في حال تم إختيار (**OLTC**) كما هو مُبين في الشكل (**4-1-16**) ووفقاً للخطوات التالية:

33.1 تحديد وضع التغيير بين الخطوات (**Taps**) يدوي (**Manual**) أو تلقائي (**Automatic**).

33.2 تحديد زمن التغيير بين الخطوات (**Tap time**).

33.3 تحديد مدة إشارة التغيير بين الخطوات (**Impulse time**).

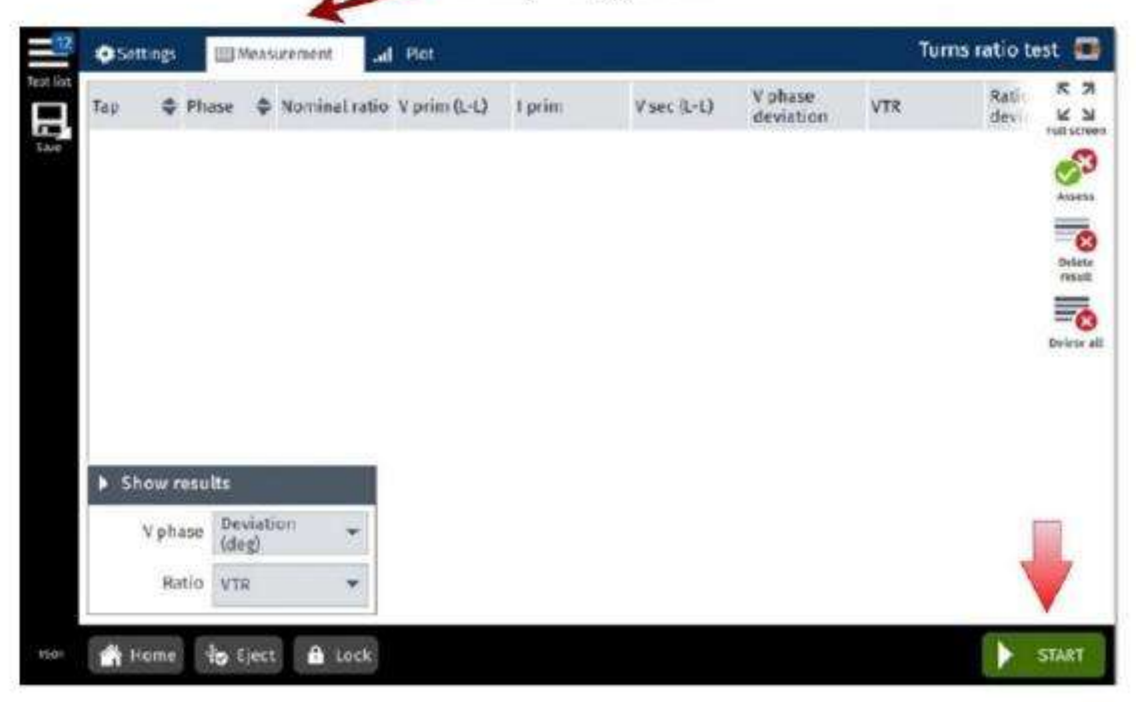
33.4 تحديد خطوة البداية (**Start Tap**) وخطوة النهاية (**Stop Tap**).



الشكل رقم (**4-1-16**)

34. بالرجوع إلى لوحة التحكم باللمس (**Touch Control**) والضغط على علامة التبويب قياسات (**Measurements**) المحاذية لنافذة التبويب إعدادات (**Settings**) لتظهر الشاشة المُبينة بالشكل (**4-1-17**) ثم نقوم بالضغط على زر إبدء (**Start**) ثم التأكد من إنارة الحلقة الزرقاء حول زر (**Start/Stop**) الظاهر في الشكل (**4-1-4**) وبذلك يكون الجهاز بوضعية الإستعداد للحقن.

نافذة التبويب - قياسات



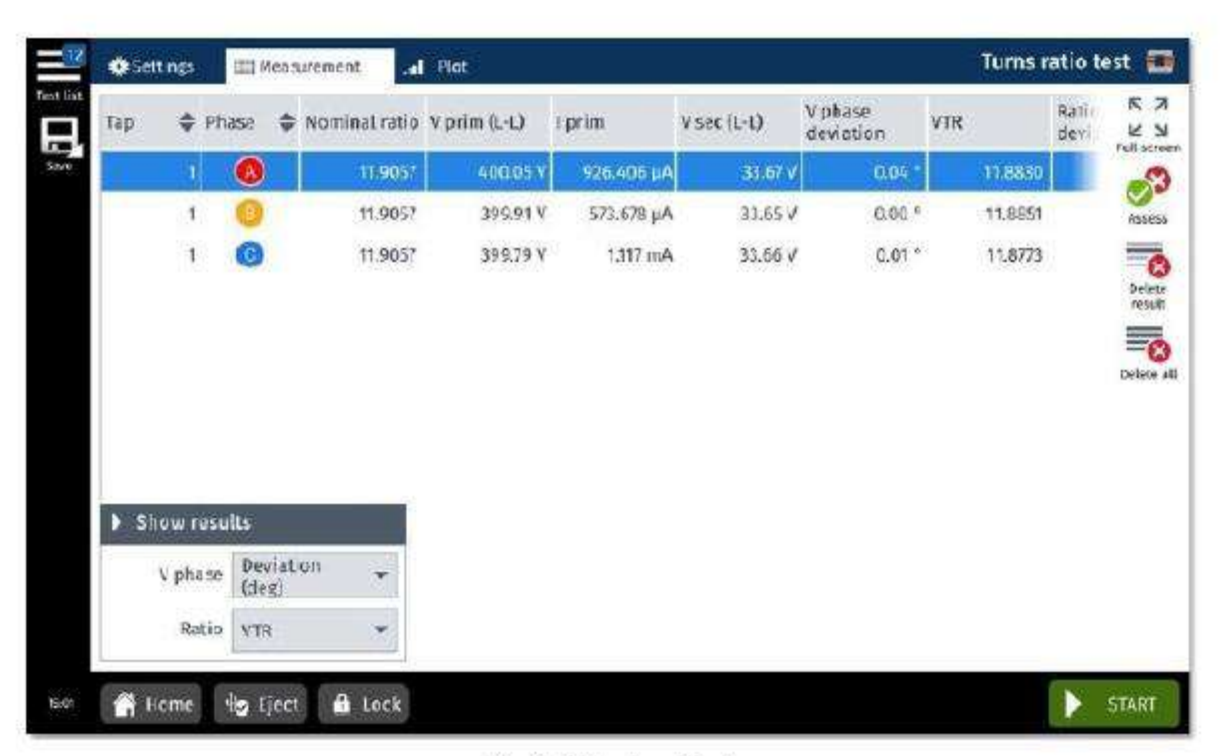
الشكل رقم (4-1-17)

35. الضغط على زر إبدء/توقف (**Start/Stop**) الظاهر في الشكل (**4-1-4**) ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الضوء الأحمر والحلقة الزرقاء حول زر (**Start/Stop**) بالوميض بشكل متقطع لمدة ثلاث ثواني تقريباً.



تحذير: لا تَقُم بإزالة أسلاك الفحص إلا بعد التأكد من أن لمبة الإشارة التحذيرية الحمراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُطفئة (**OFF**) ولمبات الإشار التحذيرية على الواجهة الجانبية لجهاز الفحص مُطفئة (**OFF**) وكذلك لمبة الإشارة الخضراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مضيئة (**ON**).

36. بعد الإنتهاء من الفحص يومض الضوء الأخضر وبعدها يمكن إيجاد النتائج في علامة التبويب قياسات (**Measurements**) كما هو مُبين بالشكل (**4-1-18**) وبذلك يكون قد إنتهى الفحص.



الشكل رقم (3-1-20)

الملحق (2-4)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص نسبة عدد لفات المحول بإستخدام جهاز TTRU3 by MEGGER



الشكل رقم (4-2-1)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(TTRU3 User Manual)
  - فولتية المدخل الإسمية : 220V, 50Hz
  - فولتية المدخل المسموح بها : 90-264V, 47-63Hz, 250VA max
  - نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

الفولتية (AC)	3Ph 1 – 48V, up to 250 on primary
التيار	0.1mA – 1A, MAX 1A @ 48V
التردد	50 -480Hz

- أساليب الفحص : حسب الجدول التالي.

3Ph Step-up
3Ph Step-down
1Ph Step-up
1Ph Step-down

- دقة النتيجة المُقاسة : حسب الجدول التالي عند درجة الحرارة (‎-20° - 50°C‎).

أسلوب الفحص	دقة القراءات
تنازلي Step-down (25-48V)	±0.05% 0.8 - 1000 ±0.10% 1001 - 2000 ±0.30% 2001 - 15000 ±1% 15001 – 50000
تنازلي Step-down (1-24V)	±0.10% 0.8 - 1000 ±0.20% 1001 - 2000 ±0.60% 2001 - 15000
تصاعدي Step-up (25-250V)	±0.05% 0.8 – 200
تصاعدي Step-up (1-24V)	±0.10% 0.8 – 200

- البيئة التشغيلية المحيطة : -4° F to 122° F (-20° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
- أبعاد الجهاز : 406 x 304 x 254 mm
- وزن الجهاز : 14 lb. (6.5 kg)

- **خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:**

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**5.1** إلى **5.5**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص نسبة عدد اللفات.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.

4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص **(Test leads)** وكذلك المشابك الخاصة بها **(Clamps)** في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير **(Calibrated)**، مع مراعاة عدم إستخدام الجهاز في الأجواء القابلة للإنفجار.
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالأشكال **(4-2-2&3)**.



الشكل رقم **(4-2-2)**

الشكل رقم **(4-2-3)**

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
   - **7.1** التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
   - **7.2** التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.

7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.

7.4 مراعاة أن يكون سطح الفحص مستوي قدر الإمكان.

7.5 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.

7.6 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خَطِر.

8. إحضار جهاز الفحص (**TTRU3**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**50°**) درجة مئوية، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.

9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (**3**) في الشكل (**4-2-3**) على وضعية (**OFF - O**) الموضحة على المفتاح.

10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (**Emergency Push Button**) رقم (**10**) في الشكل (**4-2-2**).

11. وصل جهاز الفحص بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض رقم (**1**) في الشكل (**4-2-3**) بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنِّعة أو بواسطة كيبل تأريض ذو مساحة مقطع مناسب أقرب ما يُمكن على مُشغل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (**Impedance**) قدر المستطاع، مع مراعاة أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله وآخر كيبل يتم إزالته عن الجهاز بعد الفحص.

12. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (**Low Impedance**).

13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمعاوقة قليلة (**Low Impedance**).

14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (**2**) في الشكل (**4-2-3**) بحيث يتم وصل كيبل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.

15. توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (**4-2-4**) بجهاز الفحص عبر المنافذ المبينة في الشكل (**4-2-3**) كالآتي:

15.1 توصيل كيبل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (**4**) المُبين في الشكل (**4-2-3**).

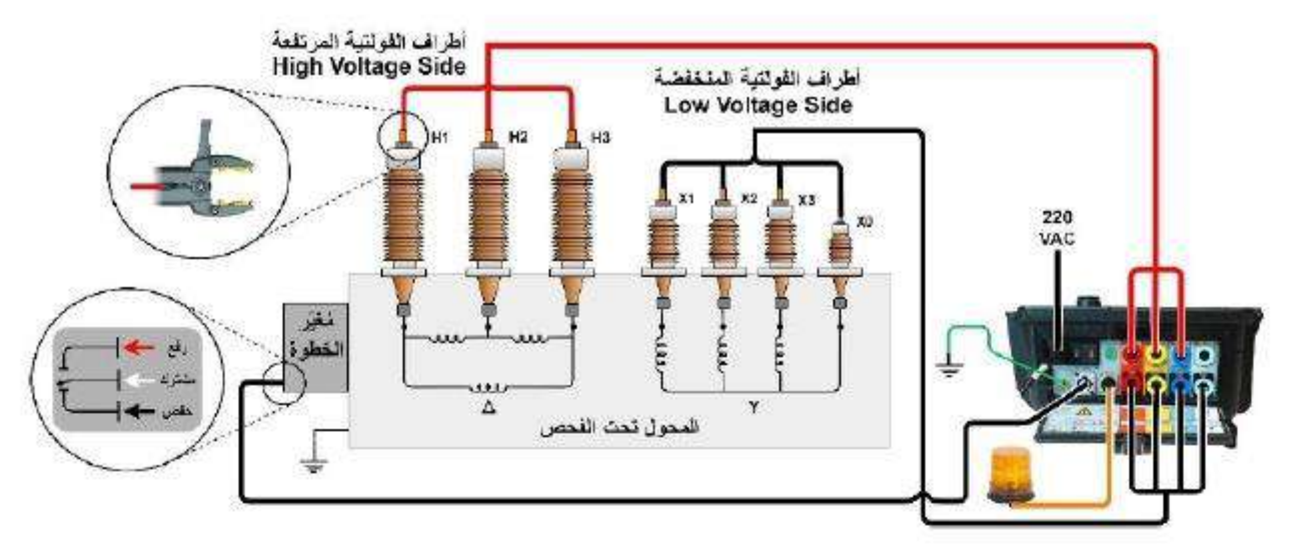
15.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة (الأسود) بالمنفذ رقم (**5**) المُبين في الشكل (**4-2-3**).

15.3 توصيل كيبل التحكم بمُغيّر الخطوة بالمنفذ رقم (**6**) المُبين في الشكل (**4-2-3**).



الشكل رقم (4-2-4)

16. توصيل كوابل جهاز الفحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المُبينة بالشكل (4-2-5).



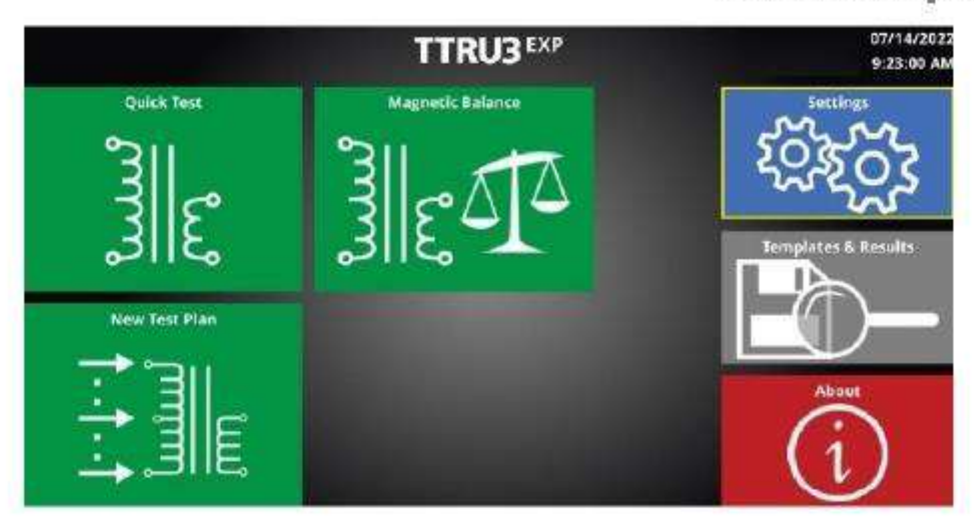
الشكل رقم (4-2-5)



تحذير: يجب التأكد من أن المشابك **(Clamps)** الخاصة بكوابل الفحص غير المستخدمة في توصيلة الفحص غير متصلة بباقي المشابك **(Clamps)** أو الأرضي أو الأشخاص.

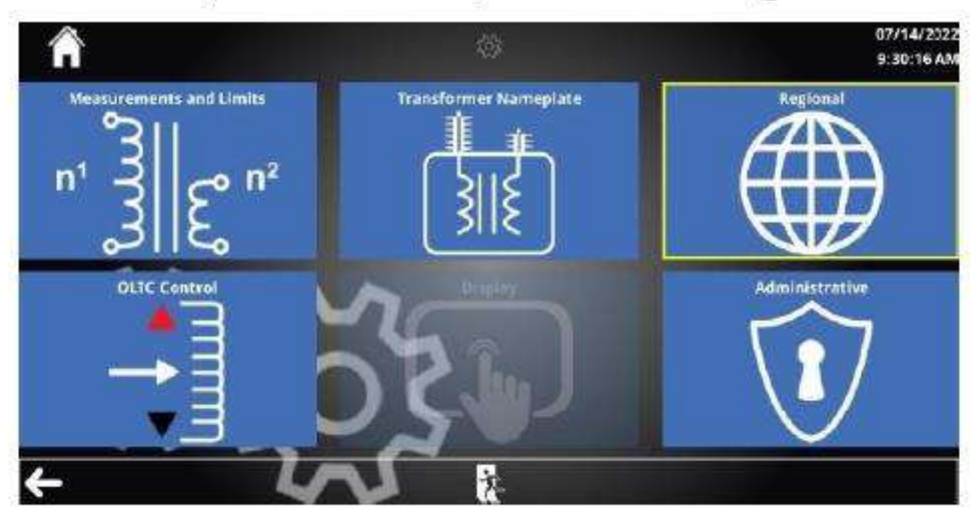
17. تشغيل الجهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم (3) في الشكل (4-2-3) عن طريق تغير وضعيته من (O) إلى (I) الموضحة على المفتاح، وملاحظة إنارة لمبة الإشارة خضراء اللون.

18. بالبداية لا بُد من ضبط الإعدادات وذلك بالضغط على كلمة (Settings) من الشاشة الرئيسية المُبينة في الشكل (4-2-6).



الشكل رقم (4-2-6)

19. بعد ذلك تظهر الشاشة المُبينة في الشكل (4-2-7)، والتي تيح لنا ضبط القياسات والحدود المسموح بها (Measurements and limits) بالإضافة لآلية التحكم بمُغيّر الخطوة (OLTC Control) وكذلك تتيح لنا إدخال بيانات المحول المراد فحصه (Transformer Nameplate).



الشكل رقم (4-2-7)

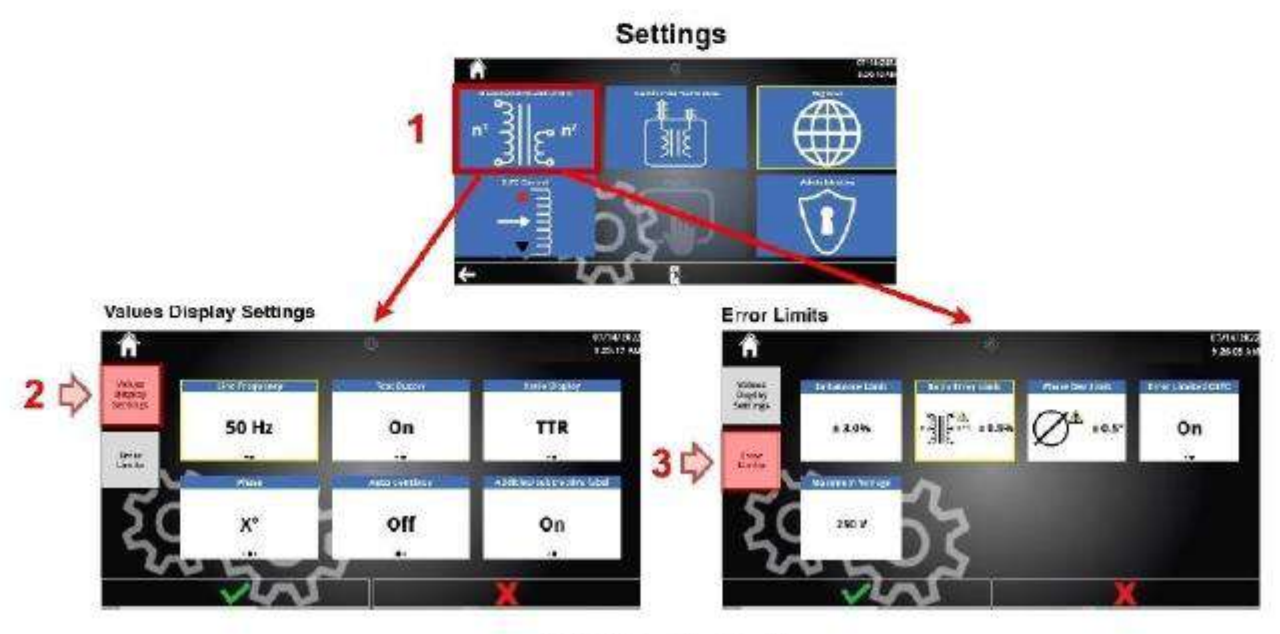
20. ولضبط إعدادت القياسات نقوم بالضغط على (Measurements and limits) لتظهر لنا شاشة ذات علامتي تبويب (Values display settings) و (Error Limits) كما هو مُبين في الشكل (4-2-8) ومنهما يمكن ضبط الآتي:

20.1 تردد الفحص: يتم ضبط التردد على (50Hz) هيرتز.

20.2 النسبة المعروضة: يتيح هذا الخيار التحكم بنوع النسبة المُستخرجة من الفحص فيما إذا كانت (TTR) أو (TNR)، علماً بأنه يُمكن التحكم بها بعد إستخراج تقرير الفحص في حال لم يتم ضبطها مسبقاً من خلال هذا الخيار.

20.3 نسبة الخطأ المسموح بها: يتيح هذا الخيار ضبط نسبة الخطأ المسموح بها فيما يَخُص فحص نسبة عدد اللفات، وكما ذُكر سابقاً وبالرجوع للمعايير العالمية يجب ضبط هذا الخيار على (0.5%) بالمئة.

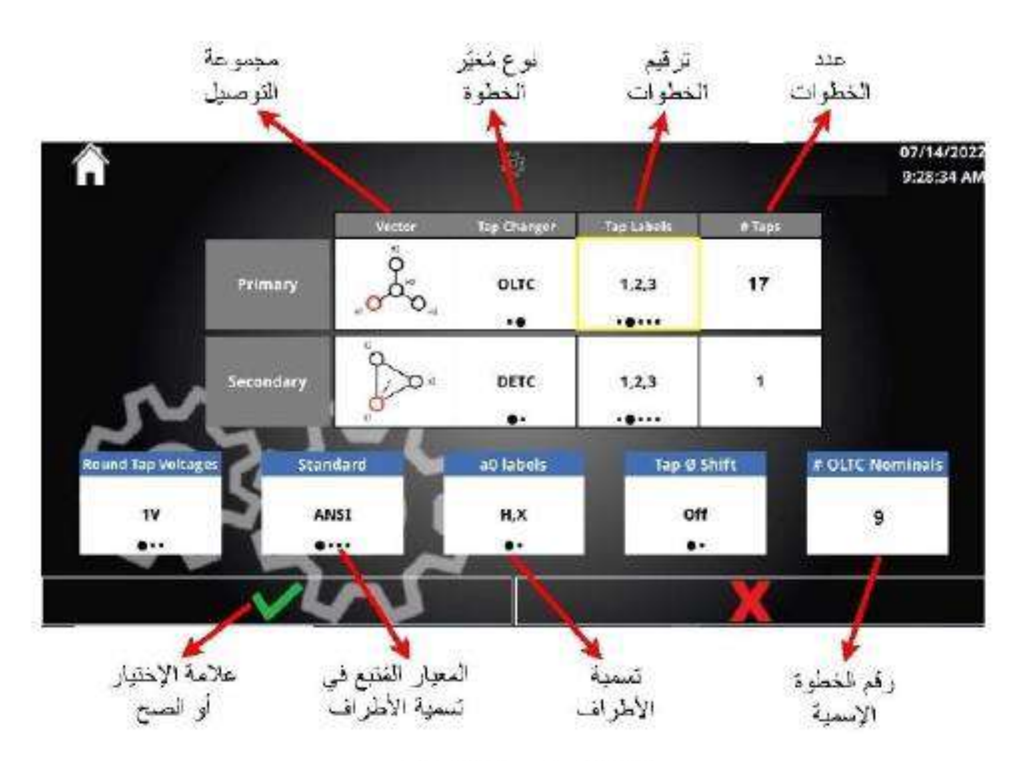
هذه أهم الخيارات التي يتم ضبطها علماً بأنه يوجد خيارات أُخرى تَخُص هذه الفحص ومنها ما يَخُص فحوصات أُخرى يتيح عملها هذا الجهاز كفحص تيار التهييج (Excitation Current Test) بالإضافة إلى إستخراج قيمة الـ(Phase Deviation).



الشكل رقم (4-2-8)

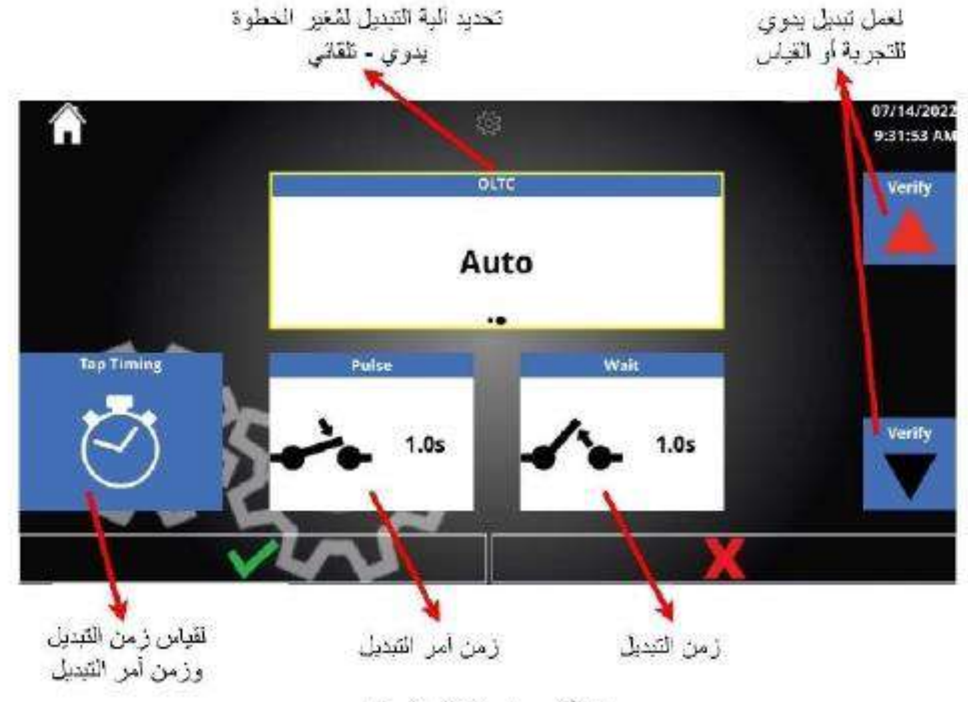
بعد الإنتهاء من ضبط القيّم السابقة يتم الضغط على علامة الإختيار (الصح) خضراء اللون للحفظ والرجوع لشاشة الإعدادات المبينة في الشكل (4-2-7).

21. ولضبط بيانات المحول نقوم بإختيار (Transformer Nameplate) من شاشة الإعدادت المُبينة في الشكل (4-2-7) لتظهر لنا الشاشة المُبينة في الشكل (4-2-9) ثم نقوم بتحديد مجموعة التوصيل (Vector Group) للمحول المُراد فحصة بالإضافة لنوع مُغيّر الخطوة (Tap changer) وعدد الخطوات (# Taps) وكذلك تحديد الخطوة المرجعيّة أو الإسمية (Nominal Tap) ومن ثم نقوم بالضغط على علامة الإختيار (الصح) خضراء اللون للحفظ والرجوع لشاشة الإعدادات.



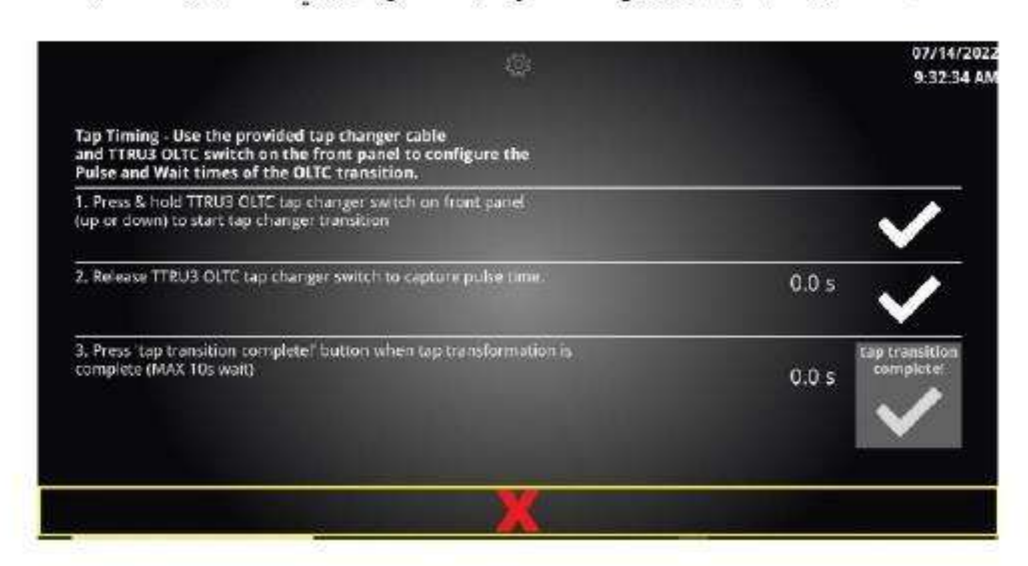
الشكل رقم (4-2-9)

22. ولضبط آلية التحكم بمُغيّر الخطوة (**OLTC**) نقوم بالضغط على خيار (**OLTC Control**) من شاشة الإعدادات (**Settings**) المُبينة في الشكل (**4-2-7**) السابق للإنتقال للشاشة الظاهرة في الشكل (**4-2-10**) ومنها يتم إختيار طريقة التحكم بمُغيّر الخطوة (**OLTC**) فيما إذا كان يدوي (**Manual**) أو تلقائي (**Automatic**)، وفي حال إختيار الوضع التلقائي (**Automatic**) يجب تحديد زمن أمر تغيير الوضعية (**Pulse**) و زمن الإنتقال من خطوة لأُخرى (**Wait**) بالثواني.



الشكل رقم (4-2-10)

في حال كنت تعلم زمن التبديل و زمن أمر التبديل يُمكنك إدخاله مباشرة بالضغط على (**Pulse**) لتحديد زمن أمر التبديل أو بالضغط على (**Wait**) لإدخال زمن التبديل. أما في حال لم تكن تعلم الأزمنة سابقة الذِكر يُمكنك الضغط على مقياس الزمن (**Tap Timing**) كما هو مُبين في الشكل (**4-2-11**).



الشكل رقم (**4-2-11**)

فبالرجوع للشاشة المبينة في الشكل (**4-2-11**) السابق ولقياس زمن أمر التبديل (**Pulse**) نقوم بتغير وضعية مُغيّر الخطوة (**OLTC**) وذلك بواسطة المفتاح رقم (**17**) المبين في الشكل (**4.2.2**) صعوداً أو نزولاً بالضغط المطول لحين بدأ حركة مُغير الخطوة وبعدها نوقف الضغط وبذلك يقوم الجهاز بإحتساب زمن أمر التبديل (**Pulse**)، و عند إنتهاء الحركة وإنتقال مُغيّر الخطوة من خطوة لآخرى نقوم بالضغط على (**!tap transition complete**) وذلك لإحتساب زمن التبديل (**Wait**).

كما ويُمكن أيضاً الضغط على (**Regional**) من شاشة الإعدادات في الشكل (**4-2-7**) السابق لضبط التاريخ والوقت الخاص بالجهاز بالإضافة لتغيير لغة الجهاز.

وبعد الإنتهاء من ضبط الإعدادات الرئيسية للجهاز نقوم بالرجوع للشاشة الرئيسية المُبينة بالشكل (**4-2-6**) وذلك بالضغط على علامة المنزل أعلى شاشة الإعدادات يميناً ⌂ ويُمكننا البدء بإعداد خطة فحص جديدة (**New Test Plan**).

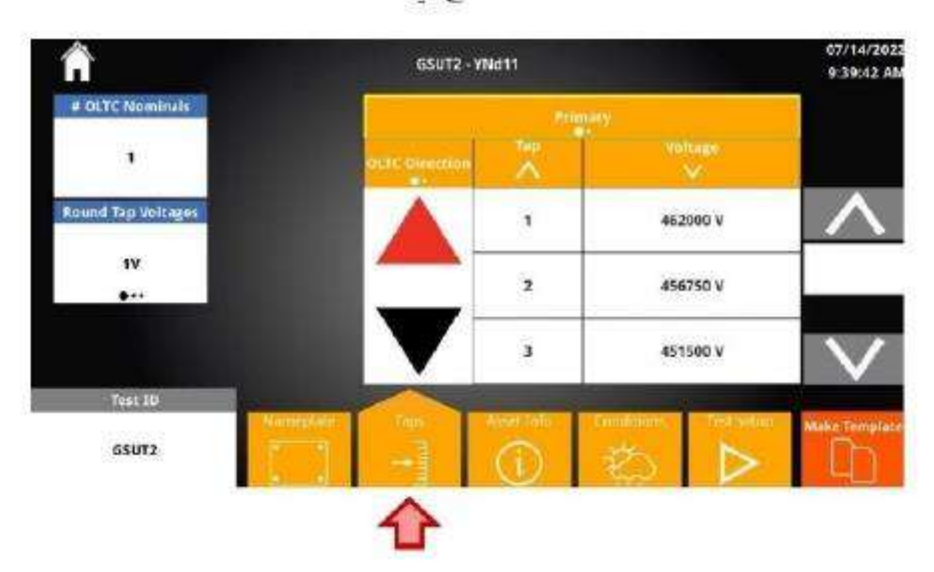
23. لبدأ إعدادات الفحص نقوم بالضغط على خطة فحص جديدة (**New test plan**) من الشاشة الرئيسية المُبينة بالشكل (**4-2-6**) لتظهر لنا الشاشة في الشكل (**4-2-12**) على علامة التبويب (**Nameplate**) والتي من خلالها نقوم بتحديد الآتي:

- **23.1** تحديد مجموعة التوصيل (**Connection Group**) للمحول المُراد فحصه.
- **23.2** تحديد نوع مُغيّر الخطوة (**TC**) لملفي المحول.
- **23.3** تحديد عدد خطوات مُغيّر الخطوة (**TC**).
- **23.4** تحديد الخطوة المرجعيّة لمُغيّر الخطوة (**TC**).
- **23.5** تحديد فولتية الملفات الإسمية بالإضافة لفولتية أول وآخر خطوة.



الشكل رقم (4-2-12)

24. الإنتقال لعلامة التبويب (**Taps**) والتي من خلالها يتم التأكد من فولتية جميع خطوات مُغيّر الخطوة (**TC**) لكلا الملفين للمحول كما هو موضح في الشكل (**4-2-13**).



الشكل رقم (4-2-13)

25. الإنتقال لعلامة التبويب (**Asset Info**) والتي من خلالها يتم إدخال معلومات المحول كما هو موضح في الشكل (**4-2-14**).



الشكل رقم (4-2-14)

26. الإنتقال لعلامة التبويب (**Conditions**) والتي من خلالها يتم إدخال إسم الشخص الذي يقوم بالفحص و سبب الفحص فيما إذا كان فحص قبول أو روتيني أو غيره من الأسباب بالإضافة للطقس و درجة حرارة الجو المحيط والرطوبة وكذلك درجة حرارة زيت المحول كما هو موضح في الشكل (**4-2-15**).



الشكل رقم (4-2-15)

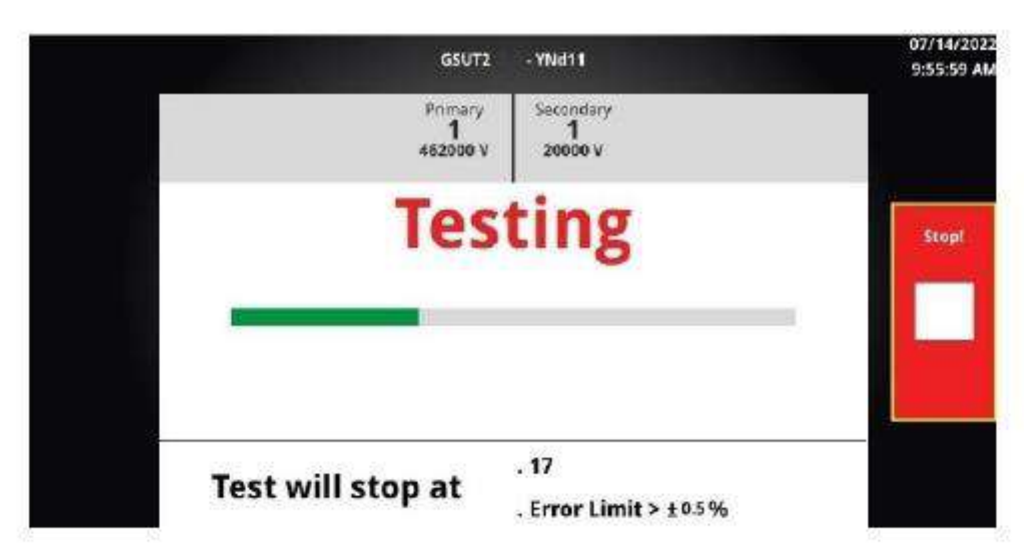
27. ننتقل لعلامة التبويب (**Test setup**) حيث أنك ستجد في علامة التبويب هذه أغلب البيانات التي تم إدخالها مسبقاً ويبقى فقط إدخال خطوة مُغيّر الخطوة (**TC**) عند بداية الفحص وفي حالتنا هذه نقوم بوضع الرقم (1) وأيضاً إدخال خطوة مُغيّر الخطوة (**TC**) عند نهاية الفحص وفي حالتنا هذه نقوم بوضع الرقم (17) بالإضافة لنمط الفحص (**Mode**) حيث يتيح لنا إختيار نمط الفحص ثلاثي الطور التصاعدي أو التنازلي وآحادي الطور التصاعدي أو التنازلي وفي حالتنا هذه تم إختيار ثلاثي الطور تصاعدي كما ويتيح لنا إختيار فولتية الفحص كما هو موضح في الشكل (**4-2-16**).





الشكل رقم (4-2-16)

28. بعد ذلك يُمكن البدء بالفحص لجميع خطوات المحول بشكل تلقائي بالضغط على زر الفحص (**TEST**) أخضر اللون لتظهر الشاشة المُبينة في الشكل (**4-2-17**) وتبدأ لمبة الإشارة الحمراء المبينة بالشكل (**4-2-2**) بالوميض إشارة لبدأ الفحص وتطبيق الفولتية المترددة.



الشكل رقم (4-2-17)

29. عند الإنتهاء من الفحص تظهر شاشة النتائج المُبينة بالشكل (**4-2-18**)، حيث يُمكن تغيير النسبة المُقاسة من (**TNR**) إلى (**TTR**) بالضغط على (**Ratio Display**) بالإضافة إلى إمكانية التنقل بين الخطوات لرؤية نتائج الفحص بواسطة الأسهم الظاهرة بالشكل.



الشكل رقم (4-2-18)

كما ويُمكن رؤية النتائج على شكل رسم بياني أو جدول بالضغط على زر (**View**) كما هو مُبين في الشكل (4-2-19).



الشكل رقم (4-2-19)

الملحق (3-4)

أطراف حقن الفولتية وقياسها لأغلب مجموعات التوصيل للمحولات كما ورد في الكُتيبات التفصيلية الخاصة بشركة (MEGGER) وفقاً لمعايير المعهد الأمريكي للمعايير الوطنية (ANSI) فيما يَخُص تسمية أطراف المحول، وللتسميات الأُخرى يمكن الرجوع للجدول في الملحق (1-1) في نهاية الفصل الأول.

Megger.

T-Type Transformers

Table C-1 ANSI Transformer Winding Phase Relationship

IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	External Jumpers	Phase tested	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Calculated Turn Ratio
T-T 0	H_2, A, B, H_1, H_3	X_2, a, b, X_1, X_3	-	A	$H_1 - H_2$	$X_1 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$
			$H_1 - H_2$ $X_1 - X_2$	B	$H_1 - H_3$	$X_1 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$
T-T 30 lag	H_2, B, A, H_1, H_3	X_2, a, X_1, b, X_3	$H_2 - H_3$	A	$H_1 - H_3$	$X_1 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X} \bullet \frac{\sqrt{3}}{2}$
			$X_1 - X_2$	B	$H_2 - H_3$	$X_1 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X} \bullet \frac{2}{\sqrt{3}}$
T-T 30 lead	H_2, B, A, H_1, H_3	X_2, b, X_3, a, X_1	$H_2 - H_3$	A	$H_1 - H_3$	$X_1 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X} \bullet \frac{\sqrt{3}}{2}$
			$X_1 - X_3$	B	$H_2 - H_3$	$X_2 - X_1$	$\frac{V_H}{V_X} \bullet \frac{2}{\sqrt{3}}$

Megger.

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
1	1 1ph0	H_1 — H_2	X_1 — X_2	1		$H_1 - H_2$	$X_1 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$	Single-phase transformer
2	1 1ph6	H_1 — H_2	X_2 — X_1	1		$H_1 - H_2$	$X_2 - X_1$	$\frac{V_H}{V_X}$	Single-phase transformer
3	Dd0	H_2, B, C, H_1, A, H_3	X_2, b, c, X_1, a, X_3	A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$	
4	Dd6	H_2, B, C, H_1, A, H_3	X_3, a, X_1, c, b, X_2	A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	
5	Dyn1	H_2, B, C, H_1, A, H_3	X_2, b, X_1, a, X_0, c, X_3	A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_0$ $X_2 - X_0$ $X_3 - X_0$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
6	Dyn7	H_2, B, C, H_1, A, H_3	X_3, c, X_0, a, X_1, b, X_2	A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_0 - X_1$ $X_0 - X_2$ $X_0 - X_3$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
7	YNyn0	H_2, B, A, H_0, H_1, C, H_3	X_2, b, X_0, a, X_1, c, X_3	A B C		$H_1 - H_0$ $H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$	$X_1 - X_0$ $X_2 - X_0$ $X_3 - X_0$	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
8	YNyn6			A B C		$H_1 - H_0$ $H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$	$X_0 - X_1$ $X_0 - X_2$ $X_0 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings
9	YNd1			A B C		$H_1 - H_0$ $H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
10	YNd7			A B C		$H_1 - H_0$ $H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
11	Dy1			A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1-(H_3-H_2)$ $H_2-(H_1-H_3)$ $H_3-(H_2-H_1)$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
12	Dyn5			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_0$ $X_1 - X_0$ $X_2 - X_0$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
13	Dy5			A B C	$H_2 - H_3$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1-(H_2-H_3)$ $H_2-(H_1-H_3)$ $H_3-(H_2-H_1)$	$X_3 - X_2$ $X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
14	Dy7			A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	H_1-$(H_3$-$H_2)$ H_2-$(H_1$-$H_3)$ H_3-$(H_2$-$H_1)$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
15	Dyn11			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_0 - X_3$ $X_0 - X_1$ $X_0 - X_2$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
16	Dy11			A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	H_1-$(H_3$-$H_2)$ H_2-$(H_1$-$H_3)$ H_3-$(H_2$-$H_1)$	$X_2 - X_3$ $X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
17	Dz0			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral
18	Dz0			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral
19	YNy0			A B C	$H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$ $H_1 - H_0$	H_1-$(H_2$-$H_0)$ H_2-$(H_3$-$H_0)$ H_3-$(H_1$-$H_0)$	$X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$ $X_3 - X_1$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on low-voltage winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
20	Yyn0			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high-voltage winding
21	Yy0			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral both wye windings
22	YNy6			A B C	$H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$ $H_1 - H_0$	$H_1-(H_2-H_0)$ $H_2-(H_3-H_0)$ $H_3-(H_1-H_0)$	$X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$ $X_1 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on low-voltage winding
23	Yyn6			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high-voltage winding
24	Yy6			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on both wye windings
25	Yzn1			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_0$ $X_2 - X_0$ $X_3 - X_0$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
26	Yz1			A+B B+C C+A	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1-(H_3+H_2)$ $H_2-(H_1+H_3)$ $H_3-(H_2+H_1)$	$X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$ $X_3 - X_1$	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral
27	Yzn5			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_0$ $X_1 - X_0$ $X_2 - X_0$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
28	Yz5			A+B B+C C+A	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1-(H_3+H_2)$ $H_2-(H_1+H_3)$ $H_3-(H_2+H_1)$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral
29	Yzn7			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_0 - X_1$ $X_0 - X_2$ $X_0 - X_3$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
30	Yz7			A+B B+C C+A	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1-(H_3+H_2)$ $H_2-(H_1+H_3)$ $H_3-(H_2+H_1)$	$X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$ $X_1 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$	No accessible neutral
31	Yzn11			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_0 - X_3$ $X_0 - X_1$ $X_0 - X_2$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
20	Yyn0			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high-voltage winding
21	Yy0			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral both wye windings
22	YNy6			A B C	$H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$ $H_1 - H_0$	$H_1-(H_2-H_0)$ $H_2-(H_3-H_0)$ $H_3-(H_1-H_0)$	$X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$ $X_1 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on low-voltage winding
23	Yyn6			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on high-voltage winding
24	Yy6			A+C B+A C+B		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X}$	No accessible neutral on both wye windings
25	Yzn1			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_0$ $X_2 - X_0$ $X_3 - X_0$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding

Megger.

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
38	YNd5	H_2, B, H_0, A, C, H_1, H_3	X_1, a, b, X_3, c, X_2	A B C		$H_1 - H_0$ $H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X \bullet \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
39	Yd5	H_2, B, *, A, C, H_1, H_3	X_1, a, b, X_3, c, X_2	A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1\text{-}(H_3+H_2)$ $H_2\text{-}(H_1+H_3)$ $H_3\text{-}(H_2+H_1)$	$X_3 - X_1$ $X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X} \bullet \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
40	Yd7	H_2, B, *, A, C, H_1, H_3	X_3, c, b, X_1, a, X_2	A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1\text{-}(H_3+H_2)$ $H_2\text{-}(H_1+H_3)$ $H_3\text{-}(H_2+H_1)$	$X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$ $X_1 - X_3$	$\frac{V_H}{V_X} \bullet \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
41	YNd11	H_2, B, H_0, A, C, H_1, H_3	X_2, c, b, X_3, a, X_1	A B C		$H_1 - H_0$ $H_2 - H_0$ $H_3 - H_0$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X \bullet \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
42	Yd11	H_2, B, *, A, C, H_1, H_3	X_2, c, b, X_3, a, X_1	A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1\text{-}(H_3+H_2)$ $H_2\text{-}(H_1+H_3)$ $H_3\text{-}(H_2+H_1)$	$X_1 - X_3$ $X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$	$\frac{V_H}{V_X} \bullet \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No.	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
43	VREG		—	1	—	S-SL	L-SL	$\frac{V_H}{V_X}$	—
44	Dyn3		—	A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_0 - X_2$ $X_0 - X_3$ $X_0 - X_1$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
45	Dy3			A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1-(H_3+H_2)$ $H_2-(H_1+H_3)$ $H_3-(H_2+H_1)$	$X_1 - X_2$ $X_2 - X_3$ $X_3 - X_1$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
46	Dyn9			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_2 - X_0$ $X_3 - X_0$ $X_1 - X_0$	$\frac{V_H}{V_X \bullet \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
47	Dy9			A B C	$H_3 - H_2$ $H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$	$H_1-(H_3+H_2)$ $H_2-(H_1+H_3)$ $H_3-(H_2+H_1)$	$X_2 - X_1$ $X_3 - X_2$ $X_1 - X_3$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	No accessible neutral on wye winding
48	YNzn1			A B C		$H_1 - H_3$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_1 - X_0$ $X_2 - X_0$ $X_3 - X_0$	$\frac{V_H \bullet \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding

Table C-2. ANSI Transformer Winding Phase Relationship

Diag No	IEC Vector Group	Winding Connection: High-Voltage Winding (H)	Winding Connection: Low-Voltage Winding (X)	Phase Tested	Winding Shorted By TTR	Winding Tested: High-Voltage Winding	Winding Tested: Low-Voltage Winding	Measured Turn Ratio	Remarks
49	YNzn7			A B C		$H_1 - H_0$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_0 - X_1$ $X_0 - X_2$ $X_0 - X_3$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
50	YNzn11			A B C		$H_1 - H_2$ $H_2 - H_1$ $H_3 - H_2$	$X_0 - X_3$ $X_0 - X_1$ $X_0 - X_2$	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$	Neutral accessible on wye winding
51	YNd3			A B C	—	H_1-H_0 H_2-H_0 H_3-H_0	X_3-X_2 X_1-X_3 X_2-X_1	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
52	YNd9			A B C	—	H_1-H_0 H_2-H_0 H_3-H_0	X_2-X_3 X_3-X_1 X_1-X_2	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$	Neutral accessible on wye winding
53	Yd3			A B C	H_3-H_2 H_1-H_3 H_2-H_1	H_1-(H_2+H_3) H_2-(H_3+H_1) H_3-(H_1+H_2)	X_3-X_2 X_1-X_3 X_2-X_1	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
54	Yd9			A B C	H_3-H_2 H_1-H_3 H_2-H_1	H_1-(H_2+H_3) H_2-(H_3+H_1) H_3-(H_1+H_2)	X_2-X_3 X_3-X_1 X_1-X_2	$\frac{V_H}{V_X} \cdot \frac{1.5}{\sqrt{3}}$	No accessible neutral on wye winding
55	YNyn2			A B C	—	H_1-H_0 H_2-H_0 H_3-H_0	$X_0 - X_2$ $X_0 - X_3$ $X_0 - X_1$	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings
56	YNyn8			A B C	—	H_1-H_0 H_2-H_0 H_3-H_0	$X_2 - X_0$ $X_3 - X_0$ $X_1 - X_0$	$\frac{V_H}{V_X}$	Neutral accessible both wye windings

الفصل الخامس

فحص معامل التبديد/القدرة و المواسعة

Dissipation/Power Factor & Capacitance test (Tanδ - PF)



فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة
Dissipation/Power Factor & Capacitance test (Tanδ - PF)

تُعتبر المادة العازلة في المحول من مكونات المحول الأكثر أهمية لما لها من تأثير على أمن وموثوقية عمل المحول وما ينعكس عن ذلك من تأثير على موثوقية الشبكة الكهربائية ككُل، كما وأن العمر التشغيلي للمحول يُقدّر تبعاً لحالة المادة العازلة داخله، لذلك لا بُد من الكشف عن حالة هذه المادة العازلة من فترة لأُخرى وذلك للتأكد من سلامة المحول وتتبُع تقادمه التدريجي المُتلازم مع تقادم المادة العازلة.

لذلك يُعتبر فحص معامل التبديد/القدرة عند التردد الإسمي من الفحوصات المهمة في هذه الشأن، حيث أنه يهدف إلى معرفة مدى جودة وكفاءة العزل الكهربائي لملفات المحول أو لعوازل الإختراق أو كما تُسمّى بجُلَب المحول (**Bushings**) بشكل عام، كما ويُقصَد بالمادة العازلة عند الحديث عن المحولات جميع مكونات نظام العزل والتي تضم الزيت و العزل الصلب للملفات بأنواعه المختلفة بالإضافة للعزل الخاص بعوازل الإختراق كالبورسلان وغيره من مواد العزل للمحول.

وتكمُن فلسفة هذا الفحص بشكل مُبسط في قياس نسبة الطاقة الضائعة في المادة العازلة إلى الطاقة الكلّية المُطبقة عليها أو ما يُسمى بخسائر العزل (**Dielectric Loss**)، ويُمكن التعبير عنها بنسبة مئوية من (صفر) إلى (**100%**) بالمئة بحيث يدُل الصفر على أن المادة العازلة نظيفة وجافة ولاتحتوي على فجوات بالإضافة إلى أنها خالية من أية دلائل على أنها غير قادرة على القيام بوظيفتها الأساسية وهي تأمين العزل المطلوب بين أجزاء المحول الفعالة المختلفة. كما وتجدُر الإشارة إلى أن هذا الفحص لا يُعتبر من فحوصات الـ(**go-no-go tests**) أي أن مخرجاته لا تكون على شاكلة (**1 – 0**) أو (ناجح – راسب) وإنما تكون على شكل تدريج مئوي كما ذُكر سابقاً من خلاله يتم تحديد حالة المادة العازلة ودرجة تقادمها.

تم إستخدام فحص معامل القدرة (**Power Factor - PF**) لأول مرة في أوائل القرن الماضي (**1900's**) من قِبَل مُصنّعي الكوابل وتم إستخدامه في مجال فحص عوازل إختراق المحولات (**Bushings**) منذ عام (**1929**)، أما فيما يَخُص فحص معامل التبديد (**Dissipation Factor - DF**) فإنه يعتمد على قنطرة شيرنج (**Schering bridge**) التي تم تطويرها هي الأُخرى في أوائل القرن الماضي (**1900's**) لتقييم حالة المادة العازلة بواسطة فصل مُركبتي تيار الشحن السعوية (**Capacitive**) والمادية (**Resistive**) للمادة العازلة.

إن فحص معامل التبديد/القدرة يتم بتطبيق فولتية مترددة (**AC**) قد تصل لـ(**10kV**) كيلوفولت ذات تردد مساوٍ للتردد التشغيلي للمحول (**50Hz**) هيرتز، وذلك بصدد معرفة سلوك المادة العازلة أثناء عمل المحول بشكل طبيعي وتعرضه للفولتية بالتردد التشغيلي، كما وتجدُر الإشارة إلى أن هذا الفحص من الفحوصات التي لا تعتمد على الزمن كفحوصات الفولتية الثابتة (**DC**) سابقة الذِكر. وبما أن مقدار فولتية الفحص أقل من قيمة الفولتية الإسمية الخاصة بالمحول فإن هذا الفحص يُعتبر من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**) أي أنه لا يُؤثر على سلامة العزل للمحول.

وفي ثنايا عملية قياس معامل التبديد/القدرة يتم إستخراج قيمة المواسعة والتي تُعد من القِيَم المهمة التي من خلالها يتم الكشف عن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للمحول، لذلك يُمكن ملاحظة أن هذا الفحص ينطوي على فحصين أولهما هو فحص معامل التبديد/القدرة و ثانيهما هو فحص المواسعة.

وكما ذُكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أيٍ من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكّن من الكشف عن سلامة نظام العزل وتتبع تقادمه بالإضافة إلى الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي كما سيتم شرحه لاحقاً.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعُنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أُخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المصنعيّة (**Quality Control - QC**) وكذلك يُعتبر من فحوصات القُبول المصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهربة المحول للمرة الأولى (**Transformer first energization**) كأحد فحوصات القُبول الموقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد عمليات الصيانة المُختلفة في الموقع.

1.4 بشكل روتيني (**Routine test**) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (**Reference value**).

1.5 تحديد الأعطال داخل المحول (**Fault detection - Diagnostic test**)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن حالة هذه المادة العازلة (**PF/DF**) بالإضافة لحالة القلب الحديدي والملفات الفيزيائية (**Capacitance**)، لذلك عادةً ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرُّض المحول لظروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على ملفات وقلب المحول الحديدي وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- ظهور نتائج غير مُرضية لفحص نسبة محتوى الماء في زيت المحول (**Water content test**).
- تعرُّض المحول لإجهاد ميكانيكي ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (**Earth faults**) أو أعطال القِصَر (**Short circuit**) أو ضربات البرق (**Lightning**) وما ينتج عنها من تيارات ذات قِيَم مُرتفعة، أو تعرُّض المحول لتيارات بدء (تدفق) مُرتفعة (**High inrush currents**).
- تعرُّض المحول لفصل قَسري (**Trip**) نتيجة لتفعّل مُرحل البوخلز (**Buchholz relay**) أو مُرحل إرتفاع الضغط المفاجئ (**Sudden pressure relay**) أو غيره من الحمايات الفيزيائية.
- قراءات غير جيدة لجهاز تسجيل الصدمات (**Impact recorder**)، حيث أن هذه الجهاز يتم تثبيته على جسم المحول أثناء نقله للتأكد من عدم تعرُّض المحول للصدمات فوق الحدود المسموح بها كتعرضه لصدمة ميكانيكية كبيرة كالسقوط أثناء عملية النقل.
- الهزات الناتجه عن الزلازل أو غيرها من الكوارث الطبيعية والتي قد تُلحِق ضرراً ميكانيكياً بالمحول.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

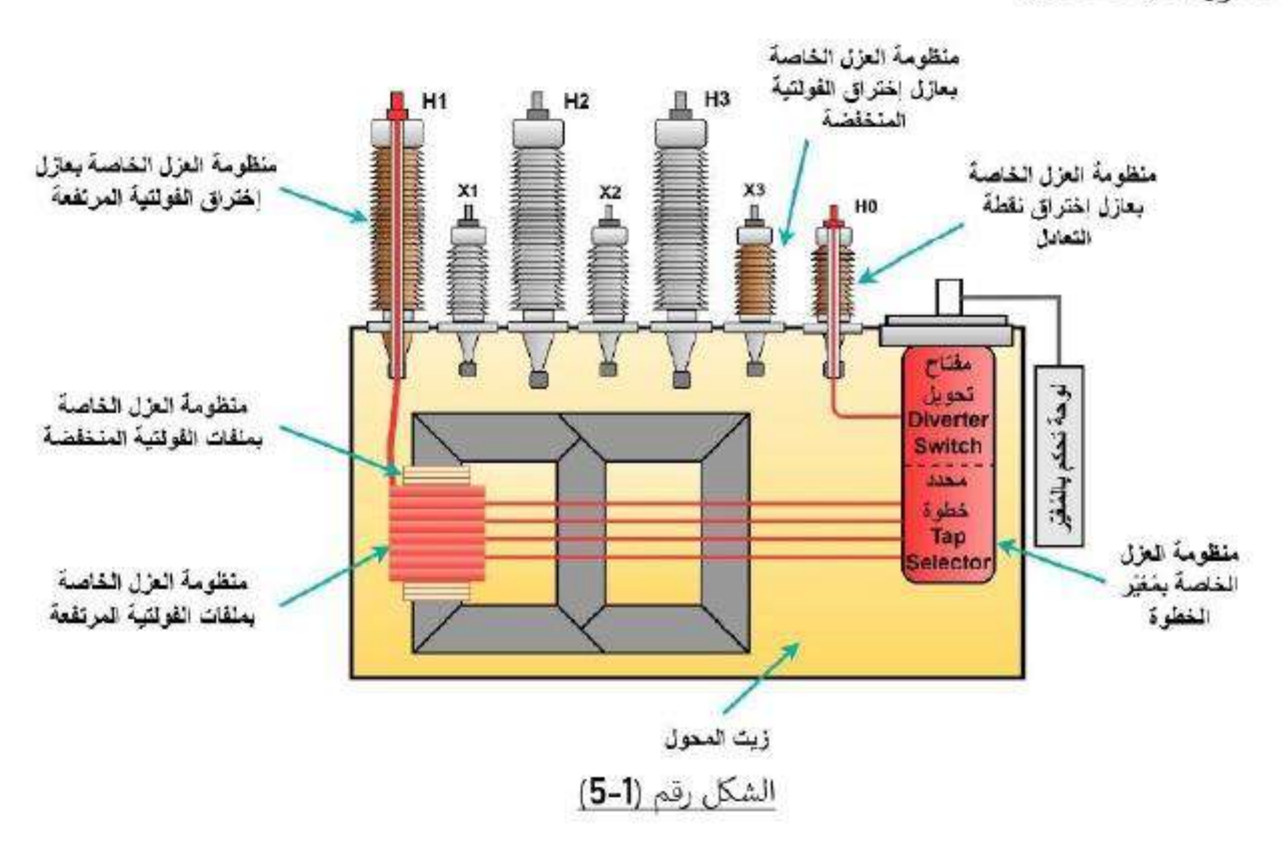
- **فحص معامل التبديد/القدرة (Dissipation/Power Factor DF&PF)**
  - ✓ محول ذو عزل رطب (**Wet/Moist insulation**).
  - ✓ محول ذو عزل مُتضرر نتيجة للكورونا أو التكربن (**Carbonization**).
  - ✓ محول ذو زيت مؤكسد أو ملوث بالجزيئات أو الحمض أو الماء.
  - ✓ وجود تفريغ جزئي أو نقاط توصيل رديئة لعازل إختراق المحول (**Bad contact on Bushing test tap and partial discharge**).
  - ✓ وجود تشققات في عوازل إختراق المحول (**Bushings**).
  - ✓ فقدان الزيت داخل عوازل إختراق المحول (**Bushings**).
  - ✓ قِصر في (**Condenser**) عوازل إختراق المحول (**Bushings**) أو إنهيار في طبقاتها الداخلية.
  - ✓ وجود كورونا في عوازل إختراق المحول (**Bushings**)

- **فحص المواسعة (Capacitance)**
  - ✓ قياس المواسعة بين الملفات (**Winding to winding**) تُمكّن من الكشف عن وجود أي تغيُّر في الخصائص الفيزيائية والهندسية لهذه الملفات، أي بمعنى آخر أنها تكشف عن وجود تغيير على موقع هذه الملفات كإختلاف المسافة الفاصلة فيما بينها نتيجة لتعرضها لإجهاد ميكانيكي كالصدمات أو مرور تيار عُطل مرتفع خلال هذه الملفات.
  - ✓ قياس المواسعة بين الملفات و الأرضي (**Winding to ground**) تُمكّن من الكشف عن أية تغيير على المسافة الفاصلة بين الملفات والأرضي نتيجة لتعرضها لإجهاد ميكانيكي كالصدمات أو مرور تيار عطل مرتفع خلال هذه الملفات.
  - ✓ قياس المواسعة بين القلب الحديدي والأرضي (**Core to ground**) تُمكّن من الكشف عن أي تغيير لموقع القلب الحديدي بالنسبة للخزان الرئيسي نتيجة لتعرضه لإجهاد ميكانيكي.

- ✓ قياس المواسعة الخاصة بعوازل إختراق الفولتية المرتفعة (**High voltage bushings**) يُمكّن من الكشف عن وجود إنهيار أو قِصَر (**Short circuit**) بين طبقات الألمنيوم المكونة لهذا النوع من العوازل (**Bushing**).

وبشكل عام فإن فحص المواسعة يُمكّن من الكشف عن وجود تغيُّرات فيزيائية (ميكانيكية) للقلب الحديدي والملفات، كما ويُعتبر هذا الفحص أكثر حساسية في الكشف عن التشوّه الشُعاعي/القُطري (**Radial deformation**) للملفات أكثر من غيره من التشوهات التي قد تطرأ لملفات المحول.

ويبين الشكل (**5-1**) مثال على منظومة العزل التي يتم إختبارها من خلال هذا الفحص للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات.



الشكل رقم (**5-1**)

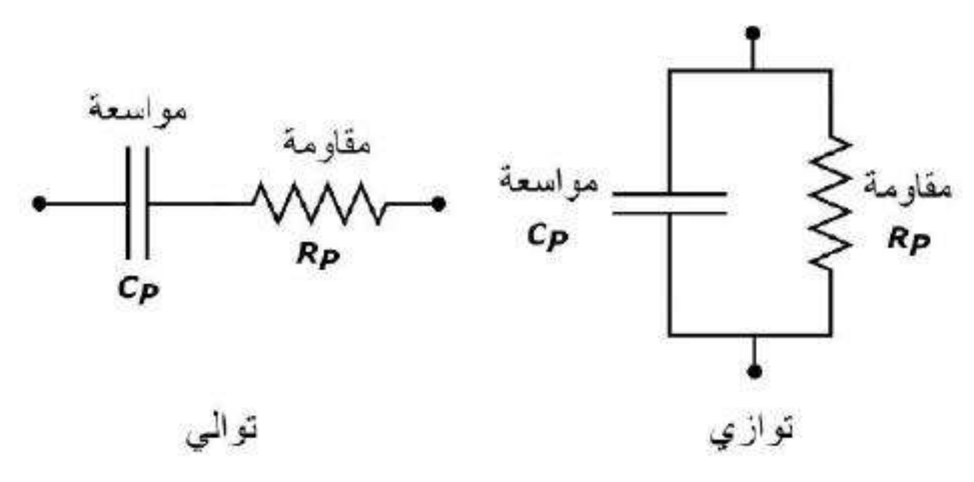
3. فلسفة الفحص

تكون المادة العازلة قادرة على إعطاء عزل كهربائي أفضل عندما تكون نظيفة وجافة ولا تحتوي على فجوات، وكذلك عندما تعمل ضمن حدود درجات الحرارة المسموح بها لهذه المادة العازلة، لذلك يُمكن القول أن أعداء المادة العازلة الأساسيين هم الحرارة والرطوبة والأكسجين.

فعند تلوّث المادة العازلة فإن التيار التسرُبي المادي (**Current Resistive Component -** I_r) المار من خلالها يزداد نتيجة لزيادة موصليتها الكهربائية، والذي بدوره يزيد من قيمة الطاقة الضائعة في العازل والتي تكون على شكل حرارة. وعندما تكون الطاقة الضائعة في العازل أكبر من الطاقة المختزنة في هذا العازل فإنه يبدأ بالتلف وتزداد الطاقة الضائعة أكثر فأكثر مما يزيد من قيمة معامل القدرة لهذه المادة. فمثلاً لو افترضنا تطبيق فولتية مقدارها (**10kV**) على مادة عازلة وكان التيار التسرُبي المادي عبر هذه المادة العازلة

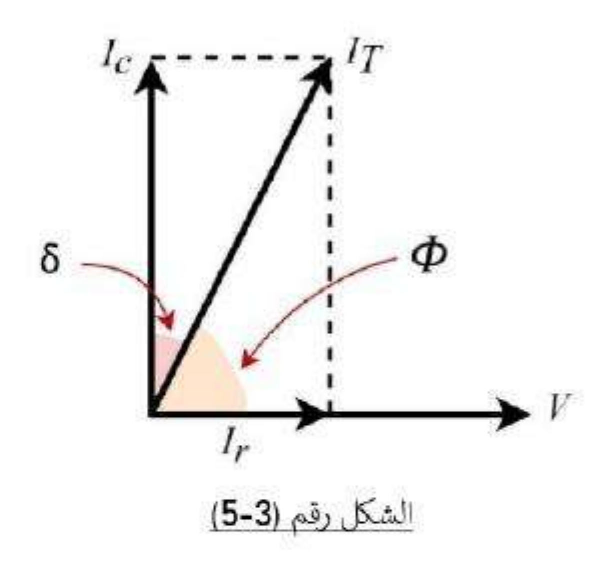
مساوٍ لـ(**2mA**) فإن الطاقة المُبددة أو الضائعة في هذه المادة العازلة على شكل حرارة ستساوي (**20Wh**) واط-ساعة أي ما مقداره (**72kJ**) كيلوجول، حيث أن هذه الحرارة تعمل على إضعاف المادة العازلة وإستهلاكها مع الزمن مما يزيد من قيمة التيار التسرُبي ويزيد من الحرارة المُبددة في العازل أكثر وأكثر مؤدياً لتلفه. لذلك يُمكن القول أن إرتفاع قيمة معامل القدرة للمادة العازلة يُعتبر من الأدلّة القوية على وجود تلف في هذه المادة العازلة.

بناءاً على ما سبق و نتيجة لإعتبار المادة العازلة مخزنة للطاقة وكذلك بالرجوع الى تعريف المادة العازلة حسب معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) على أنها مادة تأمن عزل كهربائي بين جزئين مختلفين بالفولتية، حيث أن مصطلح (العزل الكهربائي) الوارد في التعريف السابق يعني أن التيار التسرُبي (I_r) المار من خلال هذه المادة العازلة نظرياً مساوٍ للصفر (**Zero Conductivity – Zero Absorption**)، لذلك يُمكن تمثيل المادة العازلة المثالية (عديمة الضياعات) عن طريق المواسعة الكهربائية فقط، وكما هو معلوم ونظراً لصعوبة وجود مادة عازلة مثالية وذلك بسبب الرطوبة والملوثات وقطبية جزيئات المادة العازلة المتأصلة، فعادةً ما يتم تمثيل المادة العازلة بمواسعة كهربائية كما سَبق والتي تُمثل خصائص المادة العازلة الفيزيائية وهندسيتها، بالإضافة لمقاومة كهربائية موصولة على التوالي أو التوازي والتي تُمثل مُركّبة الضياعات لهذه المادة العازلة أو كما تُسمى بخسائر العازل (**Dielectric Loss**) كما هو مُبين بالشكل (**5-2**). حيث سيتم إعتماد المواسعة الموصولة على التوازي مع المقاومة الكهربائية كدائرة مُكافئة للمادة العازلة أثناء الشرح.



الشكل رقم (**5-2**)

كما هو معلوم فإنه عند تطبيق فولتية مترددة (**AC**) على المادة العازلة تقوم هذه المادة العازلة بسحب تيار شحن (**Charging current**) مكوّن من مُركّبتين الأولى سَعويّة (**Capacitive**) والثانية مادية (**Resistive**) بحيث تكون مركبة تيار الشحن السَعويّة مُتقدمة على الفولتية المُطبّقة بمقدار (**90°**) درجة وتكون مركبة تيار الشحن المادية منطبقة متجهياً (**in-phase**) مع الفولتية المُطبّقة كما يظهر بالشكل (**5-3**).



الشكل رقم (5-3)

- مركبة التيار السَعويّة – **Capacitive current component**

يُمثل هذا التيار الطاقة المختزنة في المادة العازلة وتتناسب قيمته طردياً مع الفولتية المُطبّقة على المادة العازلة وثابت العزل لهذه المادة العازلة (**Dielectric constant**) وكذلك مساحة سطح المادة العازلة، وتتناسب عكسياً مع سماكة المادة العازلة. كما ويُمكن حساب قيمة هذا التيار السَعوي بتطبيق المعادلة (**5.2**) التالية:

$$I_C = \frac{E}{X_C} = E\omega C \qquad (5.1)$$

$$I_C = E2\pi f\,\varepsilon_0\varepsilon_r\left(\frac{A}{d}\right) \qquad (5.2)$$

حيث:

E : الفولتية المُطبقة على المادة العازلة.

f : التردد.

ε_0 : ثابت العزل للفراغ (**0.08854 x 10^{-12} F/cm**).

ε_r : ثابت العزل للمادة العازلة.

A : المساحة.

d : سماكة المادة العازلة.

ومنه فإن أي تغيُّر في قيمة تيار الشحن السَعوي يُعد دليلاً على تدهور المادة العازلة نتيج لرطوبتها المرتفعة (**wetness**) أو وجود طبقات مقصورة (**Shorted layers**) أو حدوث إختلاف في أبعاد المادة العازلة الهندسية.

- مركبة التيار المادية – **Resistive current component**

يُمثل هذا التيار المُتسرب من خلال المادة العازلة الطاقة الضائعة أو ما يُسمى بخسائر العازل (**Dielectric Losses**)، وعادة ما يكون ناتج عن ظواهر مختلفة كظاهرة الكورونا أو التيار السطحي المُتسرب أو

الـ(**Carbon tracking**) أو الـ(**Volumetric leakage**)، وكما يظهر بالرسم المُتجهي الظاهر في الشكل (**5-3**) يُمكن ملاحظة أن هذا التيار المادي يكون منطبق متجهياً (**in-phase**) مع الفولتية المُطبقة، وكلما كانت قيمة هذا التيار المادي مرتفعة كلما كانت قيمة الطاقة الضائعة خلال هذه المادة العازلة مرتفعة، لذلك يتم الإعتماد عليه في هذا الفحص للكشف عن حالة المادة العازلة ودرجة تلوثها.

بناءاً على ما سبق فإن خسائر العازل (**Dielectric Losses**) قد تكون ناتجة عن ظاهرة الكورونا وفي هذه الحالة فإنها تزداد بشكل أُسي (**Exponentially**) بزيادة الفولتية المُطبّقة، أو قد تكون ناتجة عن التلوث بالماء أو الـ(**Carbon tracking**) وفي هذه الحالة فإنها تزداد تبعاً لمُربع الفولتية المُطبّقة.

- **ويبقى التساؤل المطروح "ما هو معامل القدرة (Power Factor CosPhi – PF)؟ وما هو معامل التبديد (Dissipation Factor TanDelta – DF)؟ وما هي المواسعة (Capacitance)؟"**

    - **معامل القدرة (Power factor – PF) أو كما يُسمى (CosPhi – Cosφ)**

عرّفت اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) معامل القدرة (**PF**) على أنه نسبة القدرة الفعالة (**Active power**) المُمتصة من قبل المادة العازلة إلى القدرة غير الفعالة المُطلقة (**Reactive power**)، وهذا التعريف يَصف أيضاً معامل التبديد (**DF**).

كما وعرّف معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) معامل القدرة (**PF**) للمادة العازلة على أنه نسبة القدرة المُبددة في المادة العازلة بوحدة الواط (**Watt**) إلى حاصل ضرب الفولتية الفعالة بالتيار أو ما يُسمى بالقدرة الظاهرية (**Apparent power**) بوحدة الفولت أمبير (**VA**) كما يظهر بالمعادلات التالية:

$$PF = Active\ Power\ (watt)/Apparent\ Power\ (VA) \qquad (5.3)$$

$$= \frac{I_r}{I_T} = \frac{1}{\sqrt{(2 . \pi . f . R_p . C_p}} = Cos(\varphi) \qquad (5.4)$$

يُمكن الملاحظة من المعادلات السابقة أن معامل القدرة (**PF**) مساوٍ للنسبة بين التيار المادي (I_r) و التيار الكُلي المار بالدائرة المُكافئة للمادة العازلة (I_T) وهو حاصل مجموع تياري المقاومة والمواسعة، بناءاً على ذلك فإن معامل القدرة (**PF**) ما هو إلا جيب تمام الزاوية ($Cos\ \varphi$) الفاصلة بين التيار الكُلي والفولتية المُطبقة كما هو موضح بالرسم المتجهي الظاهر في الشكل (**5-3**) السابق.
ومنه وبما أن معامل القدرة (**PF**) يتم إحتسابه بقسمة القدرة الفعالة (**Active power**) على القدرة الظاهرية (**Apparent power**) فإنه يَصف كفاءة هذه المادة العازلة (**Efficiency**) مما يُعطي معلومات إضافية عن حالة المادة العازلة ومستوى تقادمها عبر تتبُع كفائتها مع الزمن وتحت الظروف الطبيعية وغير الطبيعية التي تتعرض لها المادة العازلة أثناء عملها أو نقلها أو تخزينها.

○ معامل التبديد (Dissipation factor – DF) أو كما يُسمى (TanDelta – Tan δ)

عند تطبيق طاقة كهربائية على نظام العزل والذي سَبق وأن تم تمثيله على أنه مواسعة موصولة على التوازي مع مقاومة، فإن جزء من هذه الطاقة يتم تبديده من قبل هذه المقاومة على شكل حرارة، ولمعرفة نسبة هذه الطاقة المُبددة من قبل هذا العازل فإنها يتم اللجوء لإحتساب قيمة معامل التبديد والذي يُعطي ما يُسمى بمعدل التبديد أو الضياعات (**Rate of loss**).

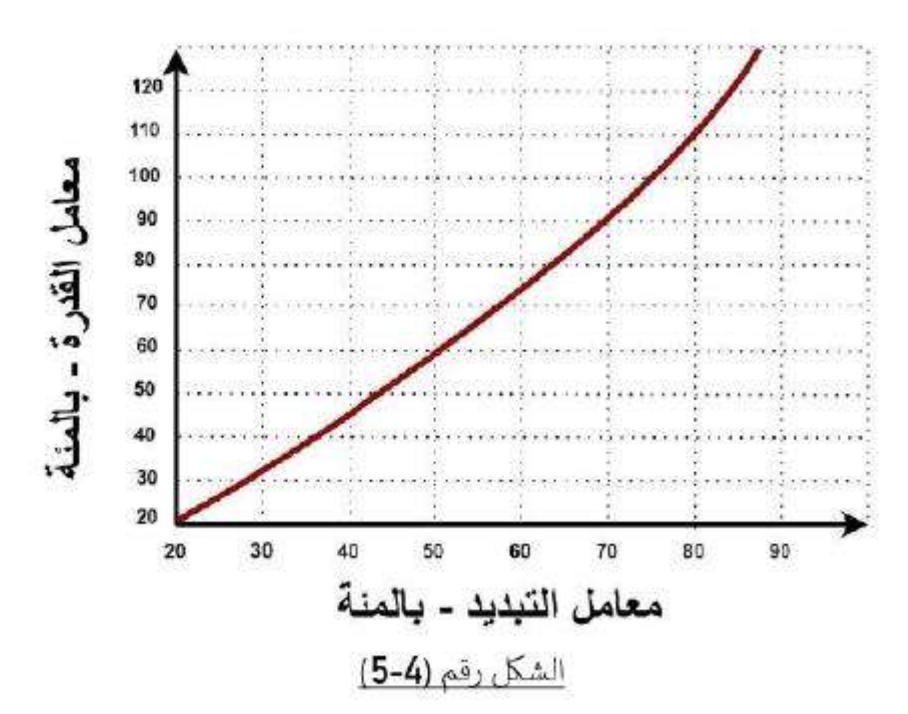
و بالرجوع لتعريف اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) لمعامل القدرة (**PF**) و التبديد (**DF**) على أنه نسبة القدرة الفعالة (**Active power**) المُمتصة من قبل المادة العازلة إلى القدرة غير الفعالة (**Reactive power**) المُطلقة يُمكن كتابة المعادلات التالية:

$$DF = Active\ Power\ (watt)/Reactive\ Power\ (var) \quad (5.5)$$

$$= \frac{I_r}{I_C} = \frac{Cos(\theta)}{Sin(\theta)} = \frac{1}{2\,.\,\pi\,.\,f\,.\,R_p\,.\,C_p} = \boldsymbol{tan(\delta)} \quad (5.6)$$



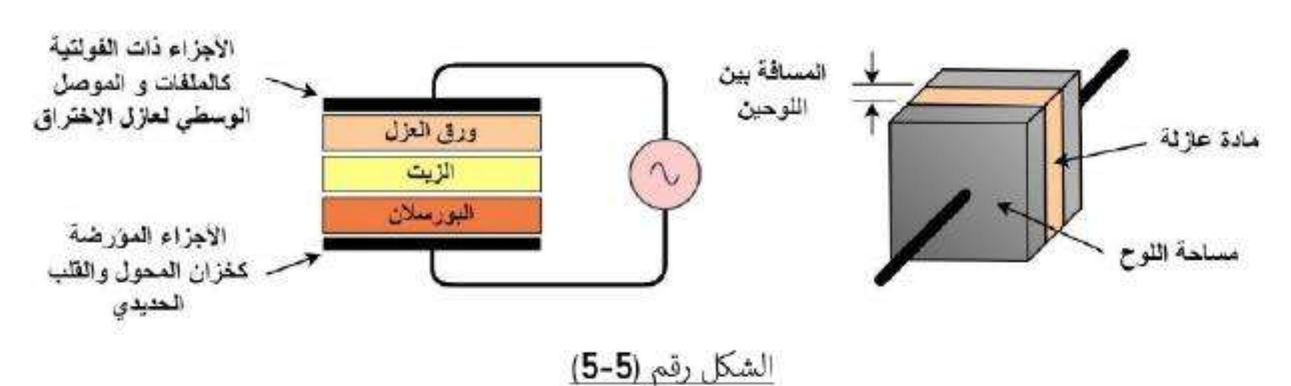
ملحوظة (1-5): تكون قيمة معامل التبديد (**DF**) النموذجية مساوية لقيمة معامل القدرة (**PF**) عندما تكون الزاوية (**phi**) الظاهرة في الشكل (**5-3**) قريبة من (**90°**) درجة، أي بصيغة أخرى إن قيمة معامل التبديد (**DF**) تكون مساوية لقيمة معامل القدرة (**PF**) عندما تكون قيمتهما أقل من (**10%**) بالمئة، أما فيما يخُص القِيَم الأكبر من (**10%**) بالمئة فإنها يتم تصحيحها وفقاً للمنحنى الظاهر في الشكل (**5-4**) كما ورد في الكُتيب التفصيلي لجهاز الفحص (**DELTA2000**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**).



الشكل رقم (5-4)

○ المواسعة (Capacitance)

تُعد المواسعة الكهربائية (**Capacitance**) مِقياساً لقدرة الدائرة على تخزين الشحنة الكهربائية، فعند تطبيق جهد على مواسع (**Capacitor**) مكوَّن من زوج من الصفائح الموصلة يَفصل بينهما طبقة من مادة عازلة تُجبَر الإلكترونات على التوجه الى أحد الألواح مما يؤدي الى أن يُصبح هذا اللوح لديه فائض من الإلكترونات (اللوح السالب) في حين أن اللوح الآخَر يُصبح لديه نقص بالالكترونات (اللوح الموجب)، بحيث تكون هنالك سِعة لكل لوح تحدد قدرته على الإحتفاظ بالإلكترونات وتعتمد على مساحة هذا اللوح.



الشكل رقم (**5-5**)

و تعتمد الشحنة الخاصة بالمواسع (**Capacitor**) على مِقدار الفولتية المُطبقة عليه وكذلك سِعة هذا المواسع كما هو مُبين بالمعادلة (**5.7**) التالية.

$$Q = C\,V \qquad (5.7)$$

حيث:

Q : شحنة المواسع.

C : مِقدار المواسعة.

V : الفولتية المُطبقة على المواسع.

و نتيجة لتغيُّر قيمة الفولتية المُطبقة على طرفي المواسع نسبة للزمن، فإنه ينشأ تيار يمر خلال هذا المواسع كما هو مبين بالمعادلة (**5.8**).

$$I_c = C\,\frac{dV}{dT} \qquad (5.8)$$

$$C = \frac{\varepsilon\,A}{d} \qquad (5.9)$$

حيث:

I_c : تيار المواسع.

C : مقدار المواسعة.

$\frac{dV}{dT}$: مقدار تغيُّر الفولتية مع الزمن.

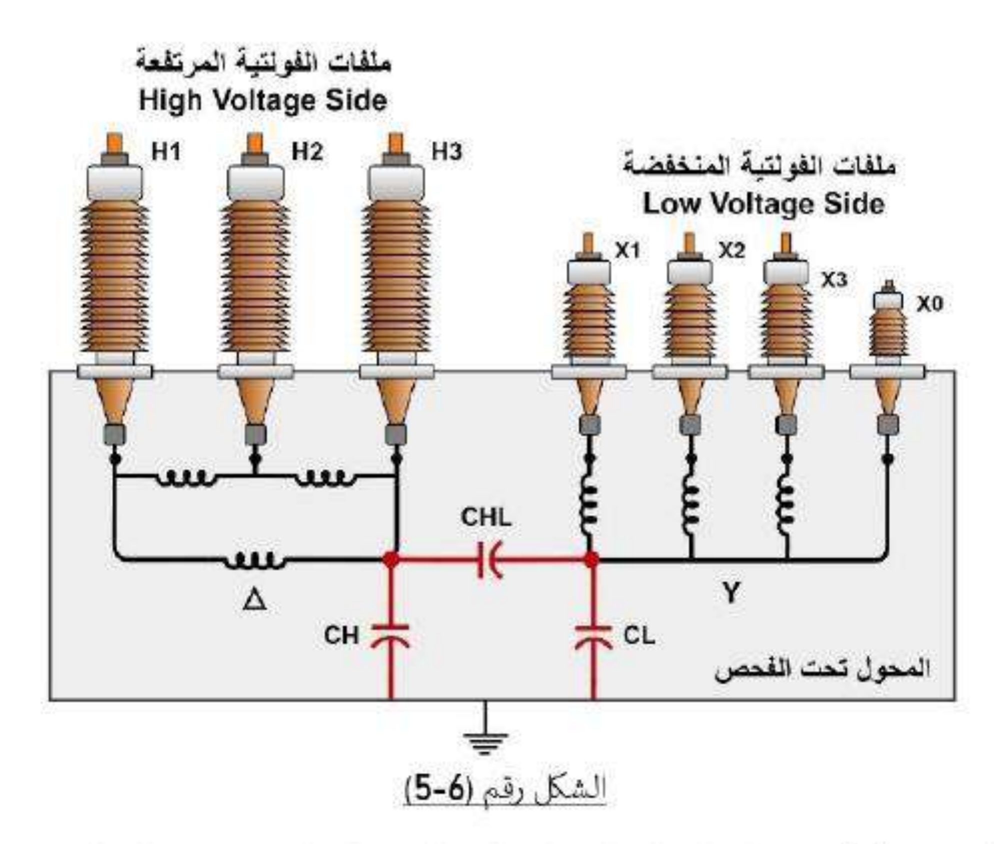
A : مساحة الألواح المكوّنة للمواسع.

d : المسافة الفاصلة بين الألواح المكوّنة للمواسع.

ومن المعادلات السابقة يظهر جَلياً أن قيمة المواسعة الكهربائية تعتمد على الأمور التالية:

- ✓ المسافة بين اللوحين: بحيث تتناسب قيمة المواسعة وقيمة الشحنة المُتكوِّنة بين الألوح تناسباً عكسياً مع مقدار المسافة بين لوحي المواسع.
- ✓ مساحة الألواح: بحيث تتناسب قيمة المواسعة وقيمة الشحنة المُتكوِّنة بين الألوح تناسباً طردياً مع مقدار مساحة لوحي المواسع.
- ✓ نوع المادة العازلة بين الألواح.

مما سبق يُمكن ملاحظة أن قيمة المواسعة الكهربائية تتأثر بمجموعة من القِيَم الفيزيائية كمساحة لوح الموصل المكوِّن لهذا المواسع (**A**) والمسافة الفاصلة بين هذه الألواح (**d**) بالإضافة لنوع المادة العازلة المُستخدمة (ε)، وهذا بدوره جعل لهذه المواسعة أهمية كبرى في الكشف عن حالة المحول الداخلية عن طريق إعطاءها دلائل على حدوث تغيير فيزيائي في بُنية المحول الداخلية كتغيُّر المسافة الفاصلة بين الملفات نتيجة لتعرضها لصدمة ميكانيكية أثناء نقل المحول أو تعرض المحول لتيارات عطل كبيرة وما ينتج عنها من قوى ميكانيكية أو أية قوى ميكانيكية أُخرى قد يتعرض لها المحول أثناء نقله أو أثناء عمله الطبيعي.



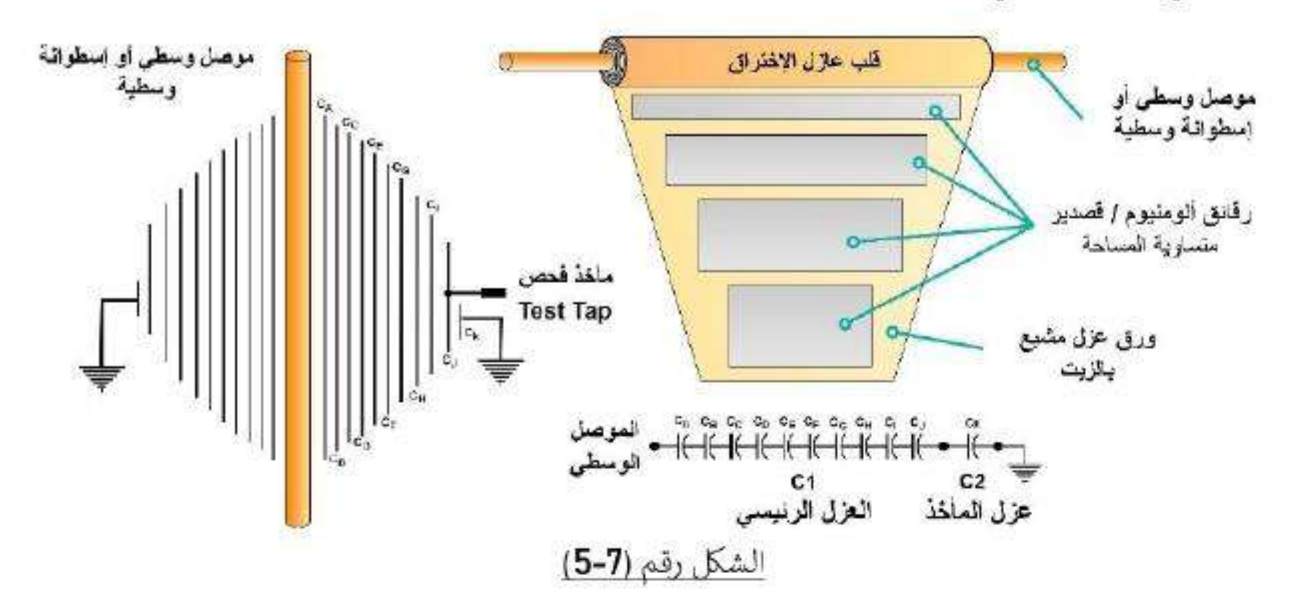
الشكل رقم (**5-6**)

ولزيادة الفهم فإنه يُمكن تمثيل نظام العزل داخل المحول وعوازل الإختراق بواسطة المواسعات حيث يُبين الشكل (**5-6**) ثلاث أقطاب رئيسية للمحول وهي ملفات الفولتية المرتفعة (**HV**) وملفات الفولتية المنخفضة (**LV**) و خزان المحول (الأرضي)، حيث تم تحديد هذه الأقطاب نتيجة لإختلاف فولتيتها عندما يَكون المحول مُكهرب (**Energized**)، وذلك لأن المواسعة الكهربائية تنشأ بين منطقتين تختلفان بقيمة الفولتية مما أدى الى نشأة مُركّبات العازل الموضحة بالشكل (**5-6**) السابق (**CH** و**CHL** و**CL**) للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات كمثال، وتُعبّر هذه المواسعات عن الآتي:

- ✓ تُعبّر المواسعة (**CH**) عن مُركّبة العزل الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة (**HV Winding**) والتي تأمّن عزلاً كهربائياً بين ملفات الفولتية المرتفعة المكهربة و نقاط التأريض. وتشمل هذه المُركّبة المواد العازلة الموجودة في عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (**HV Bushings**) والمواد العازلة الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة (**HV Winding**) نفسها وكذلك مواد العزل الأُخرى الداخلة في تكوين المحول بالإضافة الى زيت المحول.
- ✓ و تُعبّر المواسعة (**CHL**) عن مُركّبة العزل التي تأمّن عزلاً كهربائياً بين ملفات الفولتية المرتفعة المكهربة (**HV Winding**) وملفات الفولتية المنخفضة المكهربة (**LV Winding**). وتشمل هذه المُركّبة المواد العازلة الخاصة بملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة بالإضافة الى زيت المحول.
- ✓ وتُعبّر المواسعة (**CL**) عن مُركّبة العزل الخاصة بملفات الفولتية المنخفضة (**LV Winding**) والتي تأمّن عزلاً كهربائياً بين ملفات الفولتية المنخفضة المكهربة ونقاط التأريض. وتشمل هذه المُركّبة المواد العازلة الموجودة في عوازل الإختراق الفولتية المنخفضة (**LV Bushings**) والمواد العازلة الخاصة بملفات الفولتية المنخفضة (**LV Winding**) نفسها وكذلك مواد العزل الأُخرى الداخلة في تكوين المحول بالإضافة الى زيت المحول.

يُمكن تطبيق هذا الفحص أيضاً على عوازل إختراق المحولات (**Bushings**) ذات العزل الشعوي المُتدرج فقط (**Capacitive-graded bushings**) وفقاً لِمِعيار اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60137-2017]** بحيث يتم إجراء هذا الفحص لعازل الإختراق بشكل منفرد أي قبل تركيبه على المحول وبعد تركيبه كذلك.

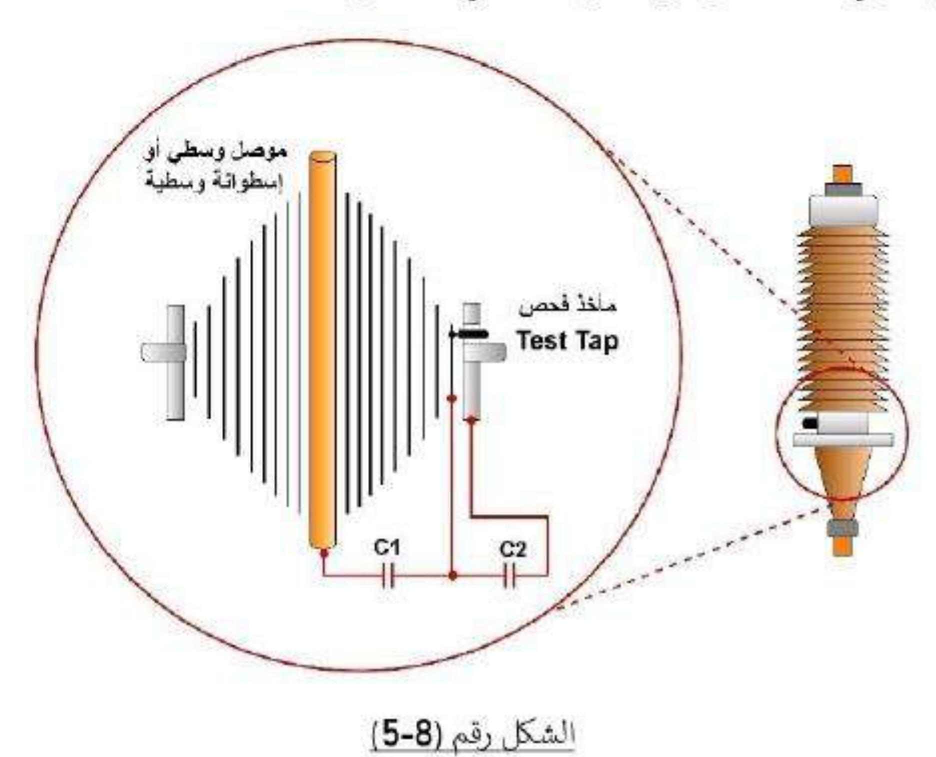
يتم تمثيل نظام العزل الخاص بعوازل الإختراق ذات العزل المتدرج بواسطة مجموعة من المواسعات الموصولة على التوالي ذات قيمة متساوية وذلك لضمان توزيع متساوٍ للمجال الكهربائي الناتج عن الموصل الوسطي كما هو مُبين في الشكل (**5-7**).



الشكل رقم (**5-7**)

كما تم شرحه في الفصل الأول فإن هذا النوع من عوازل الإختراق (**Bushings**) ذو أنواع وأشكال مختلفه فمنه ما يأتي بمأخذ فحص (**Test Tap**) كالمُبين بالشكل (**5-7**) السابق والشكل (**5-8**) بحيث تنقسم منظومة العزل الداخلية لقسمين رئيسيين؛ القسم الأول وهو العزل الرئيسي لعازل الإختراق أي العزل بين الموصل أو الإسطوانة الوسطية لعازل الإختراق من جهة ومأخذ الفحص من جهة أُخرى وعادة ما يتم

الإشاره له بالمواسعة (**C1**)، والقسم الثاني هو العزل بين مأخذ الفحص (**Test Tap**) و الأرض ويُشار له بالمواسعة (**C2**). لأغراض تشخيصية ولتحديد الأعطال في عوازل الإختراق (**Bushings**) عادة ما يتم الإعتماد على فحص مواسعة العزل الرئيسي (**C1**) أما عزل مأخذ الفحص (**C2**) فإنه لا يُستفاد منه لأسباب تشخيصية البتة، إلا أن بعض المراجع أوردت أنه من الممكن الإعتماد على قيمة معامل القدرة (**PF**) لمُركبة العزل هذه (**C2**) في الكشف عن تلوث الزيت الداخلي لعازل الإختراق.



الشكل رقم (**5-8**)

ملحوظة (5-2): عادة ما يكون ال(**Tap electrode**) مؤرضاً في حال كانت المحول بالخدمة إلا في حالات تصميمية معينة.

- **كيف يَدُل هذا الفحص على وجود أعطال في المحولات وعوازل الإختراق الخاصة بهذه المحولات (Transformer bushings):**

في ثنايا شرح فلسفة الفحص تمت الإجابة عن هذا التساؤل بالكامل، حيث أن معامل التبديد ومعامل القدرة (**DF** و **PF**) ما هما إلى نِسَب ناتجة عن قسمة القدرة الفعالة (الخسائر في حالتنها هذه) على القدرة غير الفعالة أو الظاهرية (القدرة الكلية)، وهذا بدوره يوضح بشكل جليّ أن هاذين المعاملين يدلان بشكل مباشر على كفاءة هذا العزل؛ فكلما زادت قيمة الخسائر (القدرة الفعالة) سيزداد المقدار الناتج عن قسمتها على القدرة الكلية (القدرة الظاهرية) وهذا المِقدار الناتج هو معامل التبديد أو القدرة.

أما فيما يَخُص فحص المواسعة (**Capacitance**) فكما هو معلوم أن قيمة المواسعة تعتمد على بعض القِيَم الفيزيائية وأهمها المسافة الفاصلة بين الموصلات، بناءاً على ذلك يُمكن إستنتاج أن المواسعة تصِف

الحالة الفيزيائية الداخلية للمحول وفي حال تعرُض المحول لأي إجهاد ميكانيكي كبير كالسقوط أو الصدمات أو أية أضرار ميكانيكية أُخرى كالتي يتعرض لها في حال حدوث أعطال أرضية (**Earth faults**) أو أعطال قِصَر (**Short circuit faults**) فإن هذا كله سيؤدي لتغيُّر في قيمة المواسعة المُقاسة والذي بدوره يدلنا على وجود هذا النوع من الأعطال في المحولات. ولكن عند الحديث عن فحص المواسعة لعوازل إختراق المحولات (**Bushings**) فإن الوضع يختلف قليلاً حيث أن نمط الأعطال (**Failure mode**) لعوازل الإختراق يختلف عن نظيره لملفات المحول، فكما هو ظاهر في الشكل (**5-7**) السابق فإن منظومة العزل الداخلي الرئيسي لعازل الإختراق والمُشار إليه بالمواسعة (**C1**) يتكون من مجموعة من المواسعات متساوية المقدار والموصولة مع بعضها على التوالي مما يعني أنه في حال حدوث قِصَر (**Short**) لواحدة من هذه المواسعات (نمط العطل الأكثر شيوعاً لعوازل الإختراق) فإن قيمة المواسعة الكلية ستزداد كما هو موضح بالمثال التالي:

مثال: على فرض أن قيمة المواسعات الموصولة على التوالي (C_A إلى C_J) الظاهرة في الشكل (**5-7**) تساوي (**700pF**) بيكو فاراد لكل منها فإن المواسعة المُكافئة (**C1**) ستساوي:

$$\frac{1}{C1} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_C} + \frac{1}{C_D} + \frac{1}{C_E} + \frac{1}{C_F} + \frac{1}{C_G} + \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_J}$$

$$\frac{1}{C1} = \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700} + \frac{1}{700}$$

$$C1 = \frac{700}{10} = 70\ pF$$

وفي حال حدوث عطل لأحد هذه المواسعات الموصولة على التوالي فرضاً المواسعة (C_G) حيث عادةً ما يكون نمط العطل (**Failure mode**) على شكل دائرة قِصَر (**Short circuit**) في غالب الأحيان كما تم ذِكره مُسبقاً، فإن قيمة المواسعة المُكافئة (**C1**) ستزداد كالآتي:

$$\frac{1}{C1} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_C} + \frac{1}{C_D} + \frac{1}{C_E} + \frac{1}{C_F} + \cancel{\frac{1}{C_G}} + \frac{1}{C_H} + \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_J}$$

$$C1 = \frac{700}{9} = 77.8\ pF \ \uparrow\uparrow$$

وهذا بدوره يُفسر كيف يدُلنا هذا الفحص على وجود الأعطال في المحولات وعوازل الإختراق (**Bushings**).

4. طُرق الفحص

يُمكن إجراء هذا الفحص بعدة طُرق وذلك إما بواسطة القناطر كقنطرة شيرنج (**Schering bridge**) أو قنطرة (**Transformer ratio arm Bridge**) أو قنطرة تيتكس (**Tettex bridge**) أو بطريقة (**Volt-Ampere-Watt method**) أو ما يُسمى بفحص دوبل (**Doble test**) أو بواسطة أجهزة الفحص الإلكترونية الحديثة كتلك المُصنّعة بواسطة شركة (**MEGGER**) أو غيرها من الشركات الرائدة في هذا المجال والتي تعتمد في آلية عملها على أحد القناطر سابقة الذِكر:

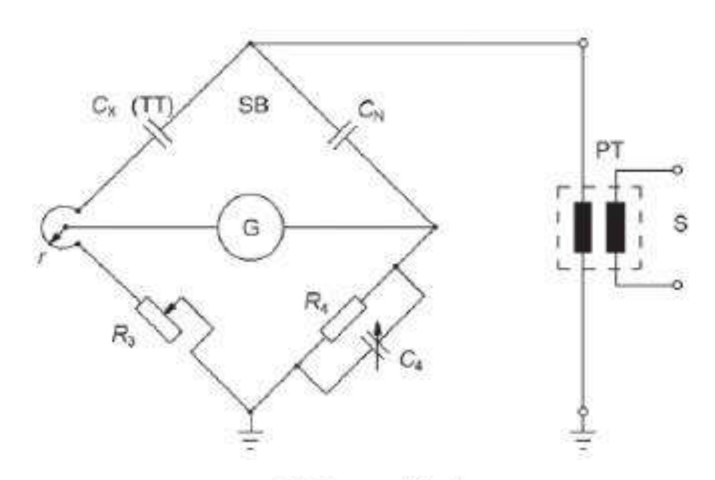
4.1 الفحص بواسطة القناطر (Bridges)

تعتمد هذه الطريقة في القياس على مقارنة مواسعة المحول تحت الفحص (C_X) بمواسعة معروفة مسبقاً $(C_N$ أو $C_S)$ أو ما يُسمى بالـ(**Standard Capacitance**).

- **قنطرة شيرنج (Conventional Schering Bridge)**

يُعد هذا النوع من القناطر من أقدام الوسائل المُستخدمة في قياس معامل التبديد/القدرة حيث تم تطويرها لأول مرة في أوائل القرن المنصرم (**1900's**)، حيث تتكون هذه القنطرة من الأجزاء التالية كما يظهر بالشكل (**5-9**) حسب [**ABB, Testing of Power Transformers Edition1**]:

- ✓ مواسعة غير معروفة (C_X) والتي تُمثل مواسعة المحول المُراد فحصه.
- ✓ مواسعة معلومة القيمة (C_N) ذات فولتية مرتفعة وضياعات عزل منخفضة وعادة ما تكون قيمتها من (**100pF**) بيكوفاراد إلى (**10nF**) نانوفاراد.
- ✓ مقاومة غير حثية ثابتة (R_4) بحيث تكون قيمتها قرابة الـ $(100/\pi)$ أو $(1000/\pi)$ أو $(10000/\pi)$ أوم إلى آخره وذلك لتبسيط الحسابات الخاصة بهذه القنطرة.
- ✓ مقاومتين غير حثيتين متغيّرتين (R_3) و (r).
- ✓ مواسعة مُتغيّرة (C_4).
- ✓ جلفانوميتير (G).
- ✓ كوابل مِحوريّة (**Coaxial cables**) للتوصيل بين (C_X) و (C_N) وذلك للتقليل من تأثير التشويش الخارجي على قيمة الفحص.



الشكل رقم (**5-9**)

بعد الوصول لمرحلة الإتزان (**Balance**) لهذه القنطرة أي عدم مرور التيار في الجلفانوميتير نقوم بإحتساب قيمة معامل التبديد ($tan\ \delta - DF$) وفقاً للمعادلة (**5.11**) التالية:

$$C_X = \frac{C_N \,.\, R_4}{R_3 + r} \quad (5.10)$$

$$tan\delta = C_4 \,.\, \omega \,.\, R_4 \quad (5.11)$$

حيث;

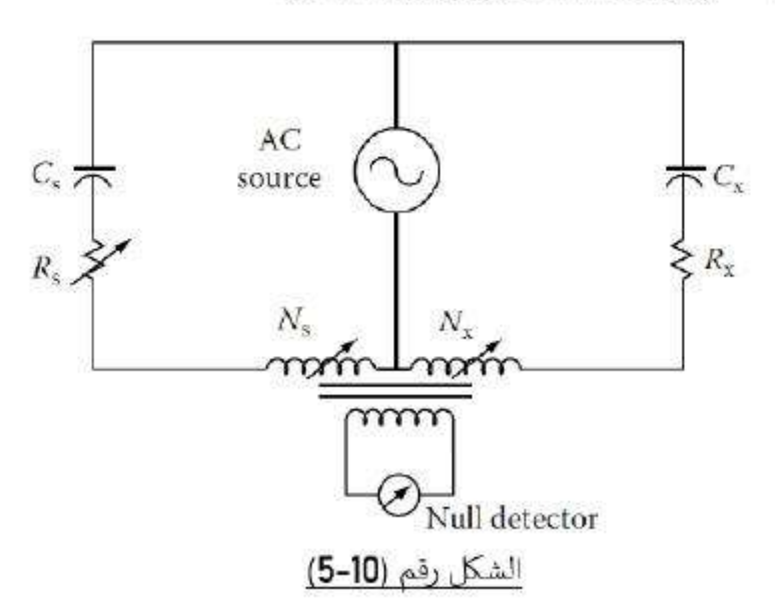
$$\omega = 2\,\pi\,f \quad (5.12)$$

وفي حال إجراء القياسات عند (**50 Hz**) هيرتز وكانت قيمة ($R_4 = 1000/\pi$) وقيمة (C_4) بالنانوفاراد فإن قيمة معامل التبديد/القدرة (**DF/PF**) يُمكن إحتسابها بإستخدام المعادلة (**5.13**) التالية:

$$tan\delta = 2\,\pi\,50\,.\,C_4\,.\frac{100}{\pi}\,.\,10^{-9}\,.\,10^{-2} = 0.01C_4\ [\%] \quad (5.13)$$

- قنطرة (**Transformer ratio arm bridge**)

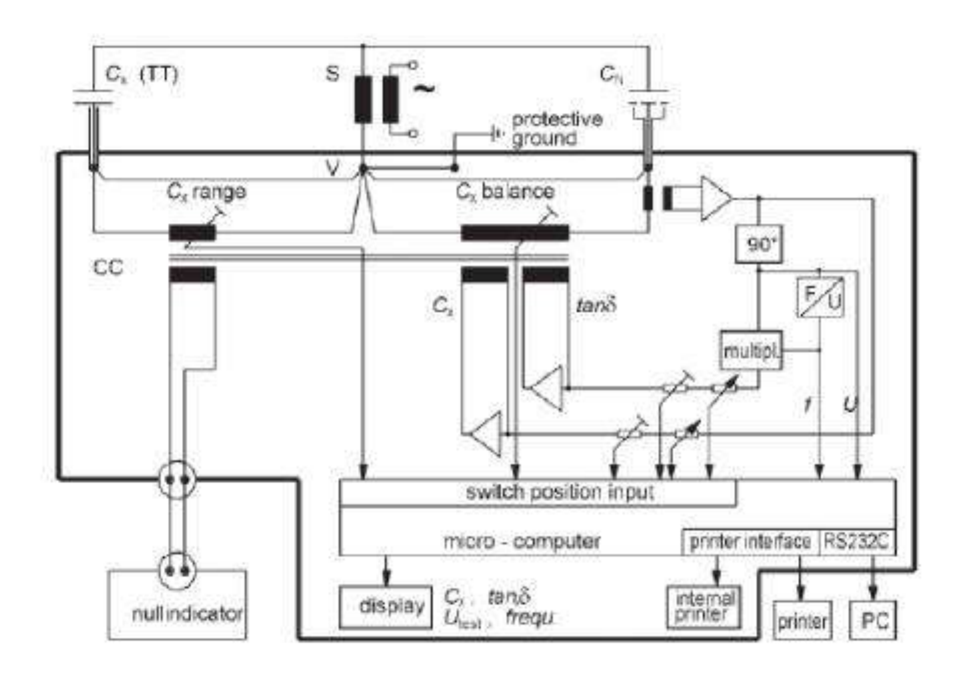
في هذه القنطرة يتم تطبيق الفولتية نفسها على المواسعة المرجعية (C_S) و المواسعة المُراد قياسها (C_X) ومن ثم يتم موازنة تيار المواسعة المرجعيّة وتيار المواسعة المُراد قياسها عن طريق تغيير عدد لفات أذرع محول التيار التفاضلي (N_S و N_X)، وكذلك يتم موازنة التيار المادي المار بالمقاومة المُراد قياسها (R_X) مع التيار المادي المار بالمقاومة المُتغيرة (R_S) عبر تغيير قيمة هذه المقاومة المُتغيرة، وبعد الوصول لحالة الإتزان يتم إحتساب قيمة المواسعة (C_X) و المقاومة (R_X) ومنه يتم إحتساب قيمة معامل التبديد/القدرة. الشكل (**5-10**) الوارد بالمرجع **[Paul Gill, Electrical Power Equipment Maintenance and Testing]** يبين إستخدام هذه القنطرة في أجهزة الفحص المُصنّعة بواسطة شركة (**MEGGER**) العالمية للطراز (**DELTA2000**) و (**DELTA3000**).



الشكل رقم (**5-10**)

- قنطرة حساب معامل التبديد بإضافة مقارن تيار ومعالجات دقيقة (DF bridge with current comparator and microprocessor)

في هذه القنطرة يتم إحتساب معامل التبديد/القدرة بنفس مبدأ العمل الخاص بقنطرة شيرنج (Schering Bridge)، حيث أن التيار يتم عمل إتزان له في المُقارن (Comparator) بحقن تيار لموازنة الضياعات كما يظهر في الدائرة الخاصة بهذه القنطرة في الشكل (5-11) من نوع (TETTEX 2809) حسب [ABB, Testing of Power Transformers Edition1].

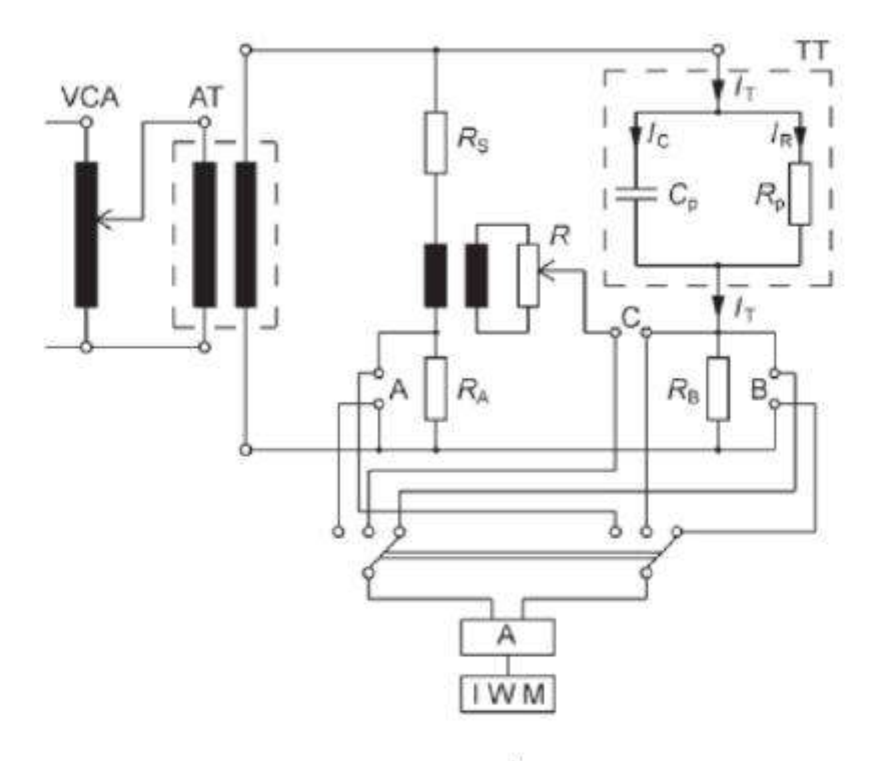


الشكل رقم (5-11)

4.2 فحص دوبل أو ما يُسمى بطريقة الفولت – أمبير - واط (Doble test "Volt-ampere-watt method")

يعتمد هذا الفحص على قياس تيار الشحن المتردد وكذلك ضياعات المادة العازلة بالإضافة لمواسعة المادة العازلة للمحول تحت الفحص، بحيث يتم إحتساب معامل التبديد/القدرة بالإعتماد على قيمة التيار والضياعات سابقة الذكر.

الشكل (**5-12**) يُبين دائرة فحص دوبل (**Doble test**) مُبسّطة حسب **[ABB, Testing of Power Transformers Edition1]**.



الشكل رقم (**5-12**)

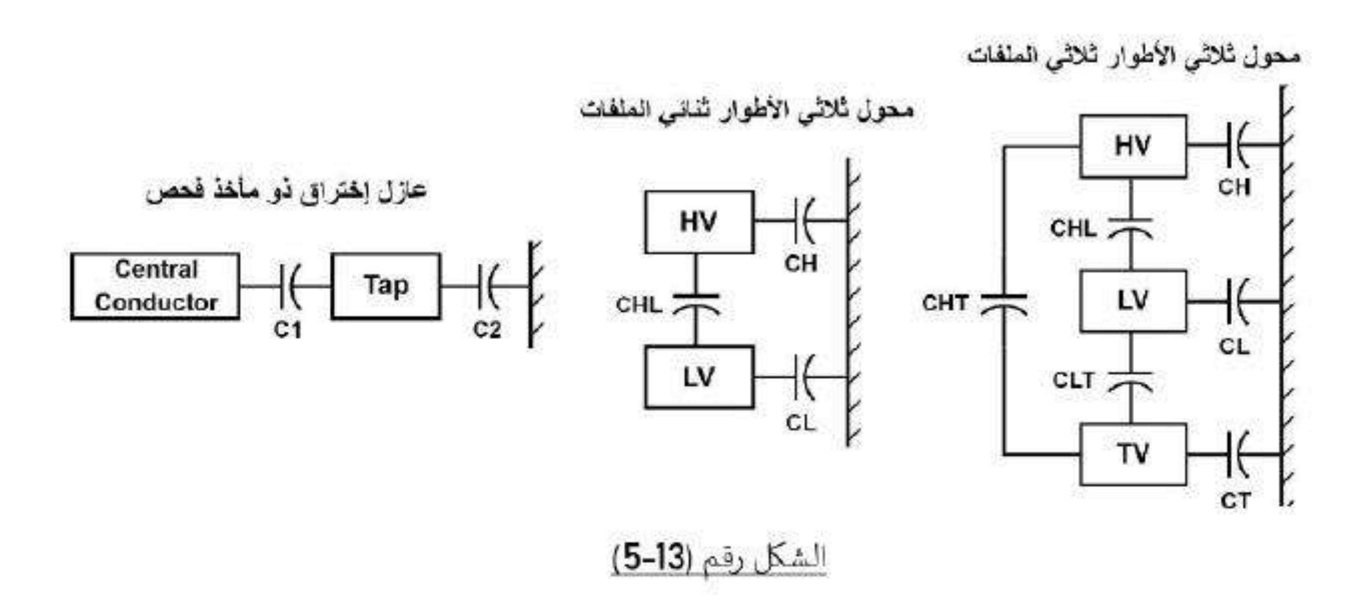


ملحوظة (5-3): عند فحص عوازل إختراق المحولات (**Bushings**) بإستخدام القناطر يُنصح بإستخدام القنطرة من نوع (**Transformer-ratio arm type**).

4.3 الفحص بإستخدام أجهزة الفحص الحديثة؛ مثل جهاز (**DELTA 2000 by MEGGER**) كما سيتم شرحه بالملحق رقم (**5-1**).

5. أساليب الفحص

تعد المحولات وعوازل الإختراق من المُعدات التي تحتوي على منظومة عزل مُركّبة فكما هو مُبين بالشكل (**5-13**) للمحولات ثلاثية الطور ثنائية وثلاثية الملفات فإن منظومة العزل تتكون من العزل بين الملفات المختلفة وبين الملفات والأرض، أما عوازل الإختراق (**Bushings**) ذات العزل المتدرج (**Graded insulation bushings**) فإن منظومة العزل الخاصة بها تتكون عادةً من العزل الرئيسي والذي يكون بين الموصل الوسطي ومأخذ الفحص (**Test tap**) و العزل الثانوي أو عزل المأخذ والذي يكون بين مأخذ الفحص و الأرضي وذلك لعوازل الإختراق ذات مأخذ الفحص (**Test tap**).

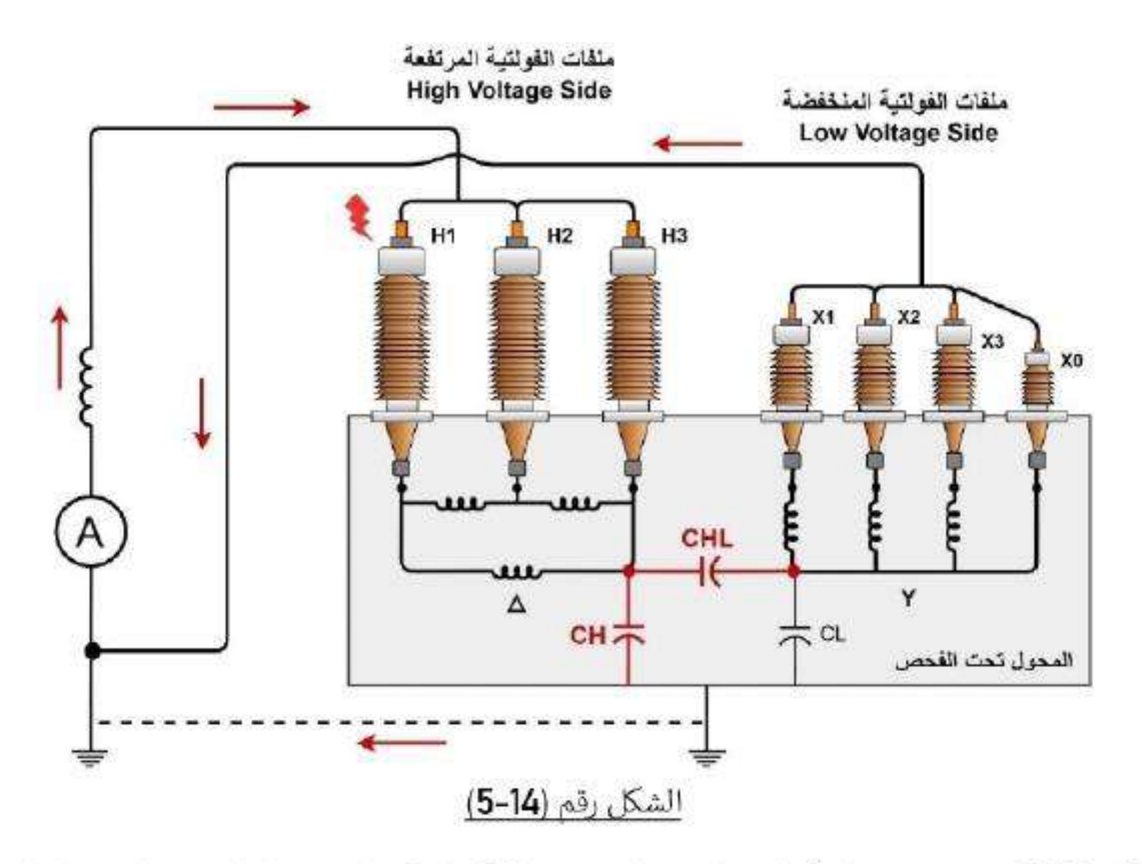


الشكل رقم (5-13)

مما سبق ونظراً لتعقيد نظام العزل للمحولات وعوازل إختراق هذه المحولات، وَجبَ إختيار الأسلوب المناسب للفحص وفقاً لنوع مُركّبة العزل المُراد فحصها فيما إذا كانت بين الملفات أو بين الملفات والأرضي أو غيرها من مُركّبات العزل. حيث تتلخص هذه الأساليب بثلاثة رئيسية كالآتي:

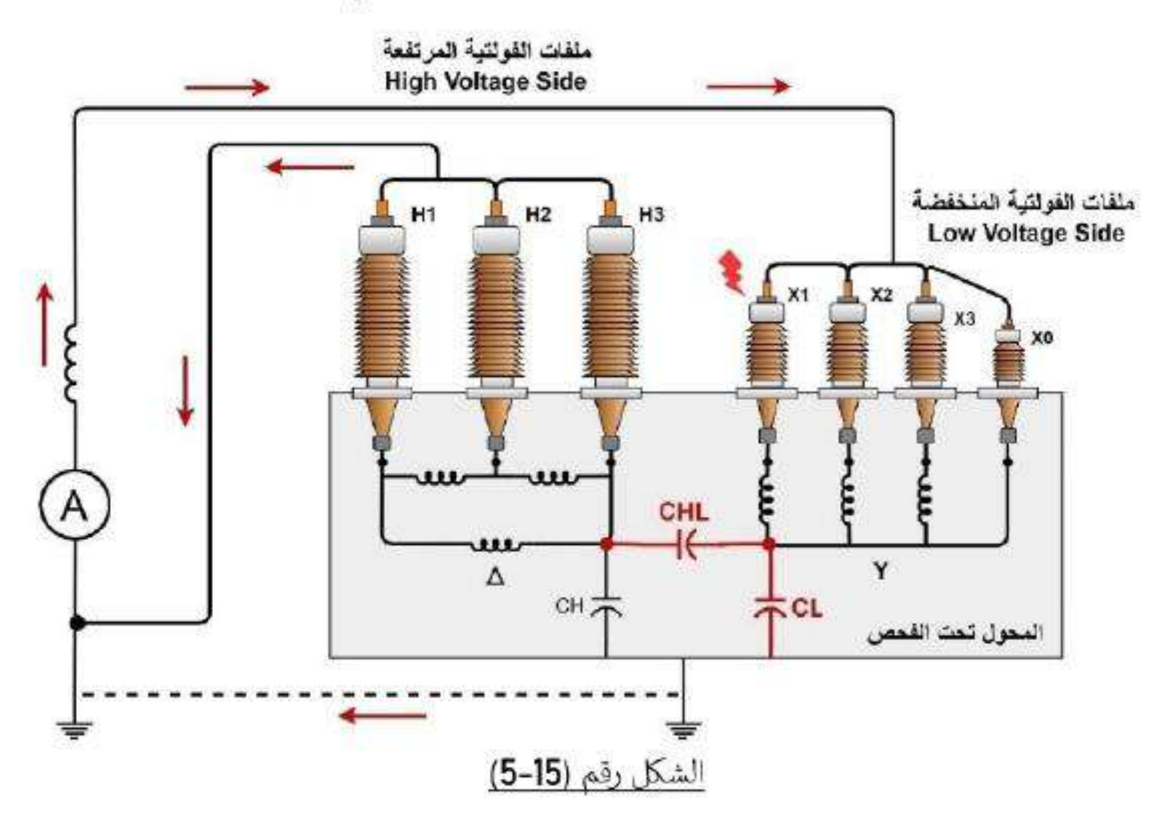
5.1 عينة فحص مؤرضة - Grounded Specimen Test (GST)

عادة ما يتم إستخدام هذه الأسلوب للمحولات عند فحص العزل بين الملفات المختلفة (**HV** و**LV** و**TV**) مُضافاً إليه عزل أحد هذه الملفات مع الأرضي كما هو مبين بالشكل (**5-14**) الذي يوضح توصيلة الأسلوب (**GST**) المُتّبع لفحص العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة من جهة مضافاً إليها عزل ملفات الفولتية المرتفعة مع الأرض (**CHL + CH**) من جهة أخرى لمحول ثلاثي الاطوار ثنائي الملفات، بحيث يتم تطبيق الفولتية على ملفات الفولتية المرتفعة للمحول وقراءة التيار التسرُبي عبر ملفات الفولتية المنخفضة وكذلك الأرضي.



الشكل رقم (5-14)

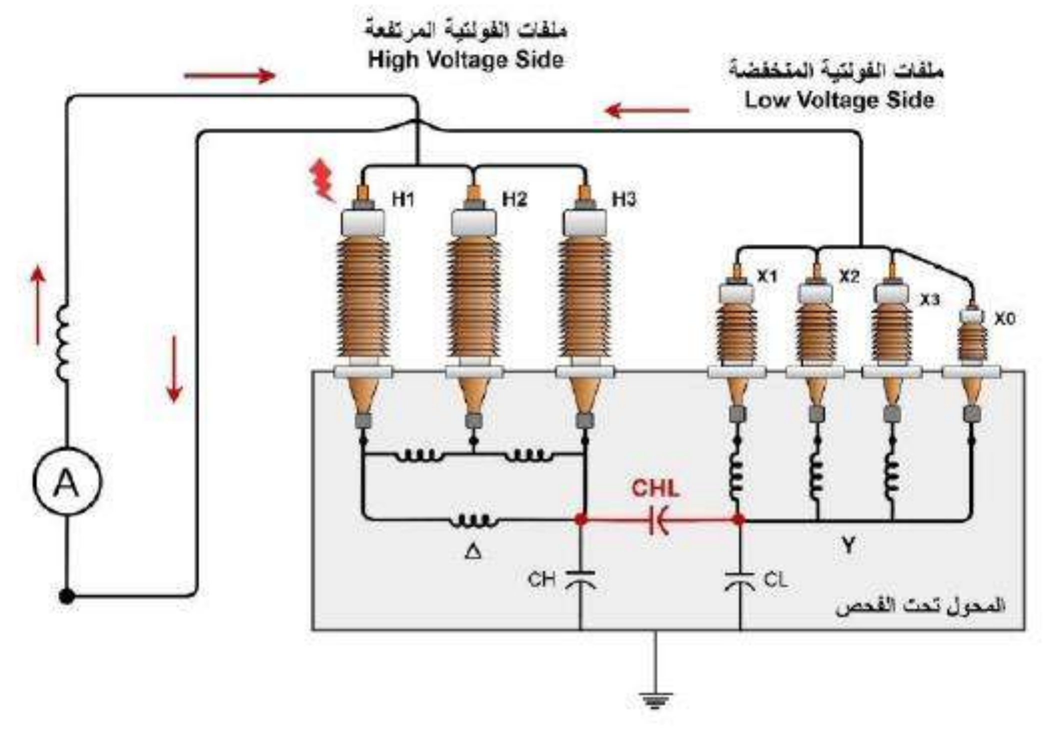
الشكل (**5-15**) يوضح توصيلة أسلوب العيّنة المؤرضة (**GST**) المُتّبع لفحص العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة من جهة مضافاً إليها عزل ملفات الفولتية المنخفضة مع الأرض (**CHL + CL**) من جهة أخرى لمحول ثلاثي الاطوار ثنائي الملفات، بحيث يتم تطبيق الفولتية على ملفات الفولتية المنخفضة للمحول وقراءة التيار التسرُبي عبر ملفات الفولتية المرتفعة وكذلك الأرضي.



الشكل رقم (5-15)

5.2 عينة فحص غير مؤرضة - Ungrounded Specimen Test (UST)

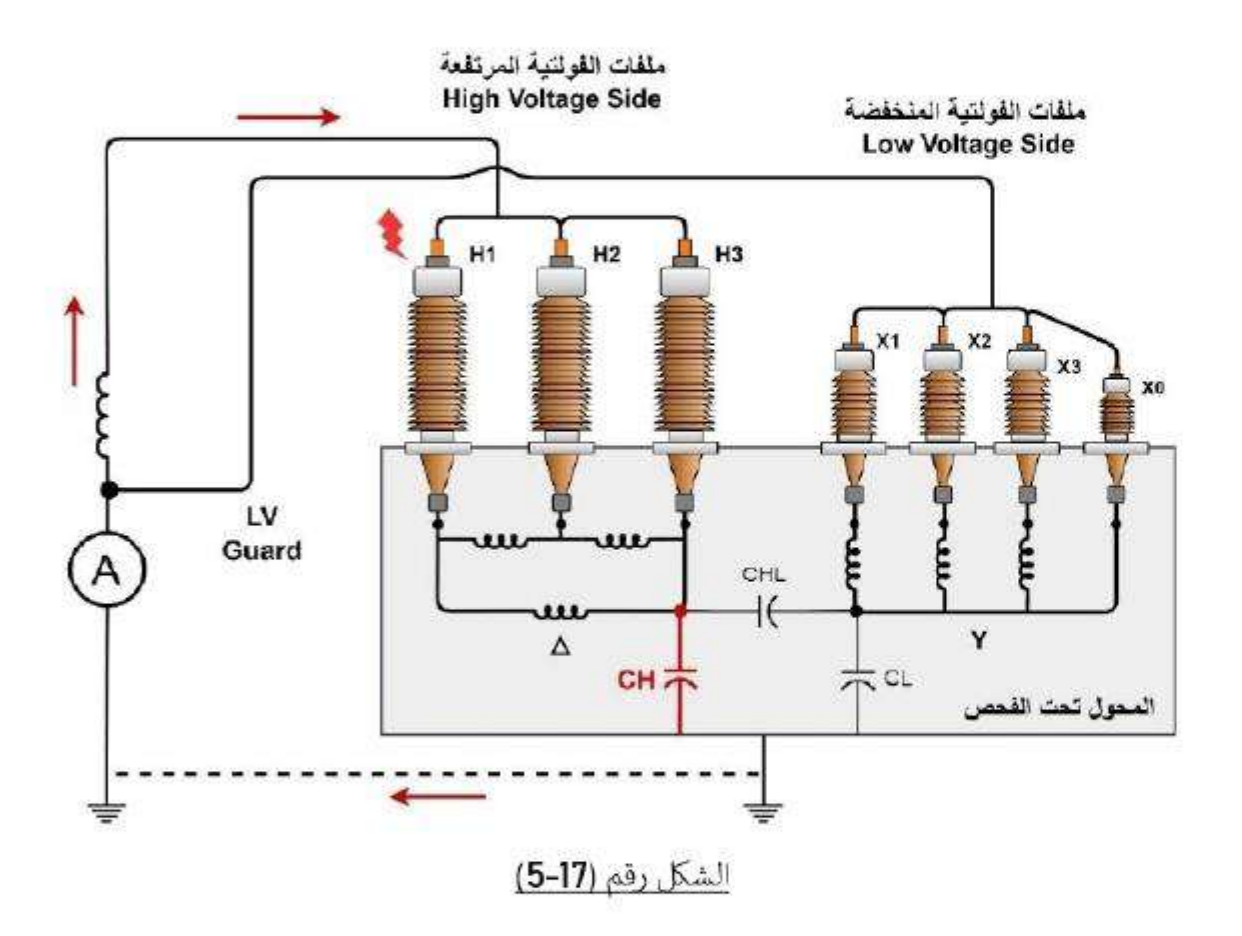
عادة ما يتم إستخدام هذا الأسلوب للمحولات عند فحص العزل بين الملفات المختلفة فقط (CHL) كما هو موضح بالشكل (5-16)، بحيث يتم تطبيق الفولتية على ملفات الفولتية المرتفعة/المنخفضة للمحول وقراءة التيار التسرُبي عبر ملفات الفولتية المنخفضة/المرتفعة فقط. بالإضافة إلى أن هذا الأسلوب يُستخدم بشكل أساسي لفحص العزل الرئيسي (C1) لعوازل الإختراق (Bushings) كما يظهر في الشكل[(5-19) (أ)].



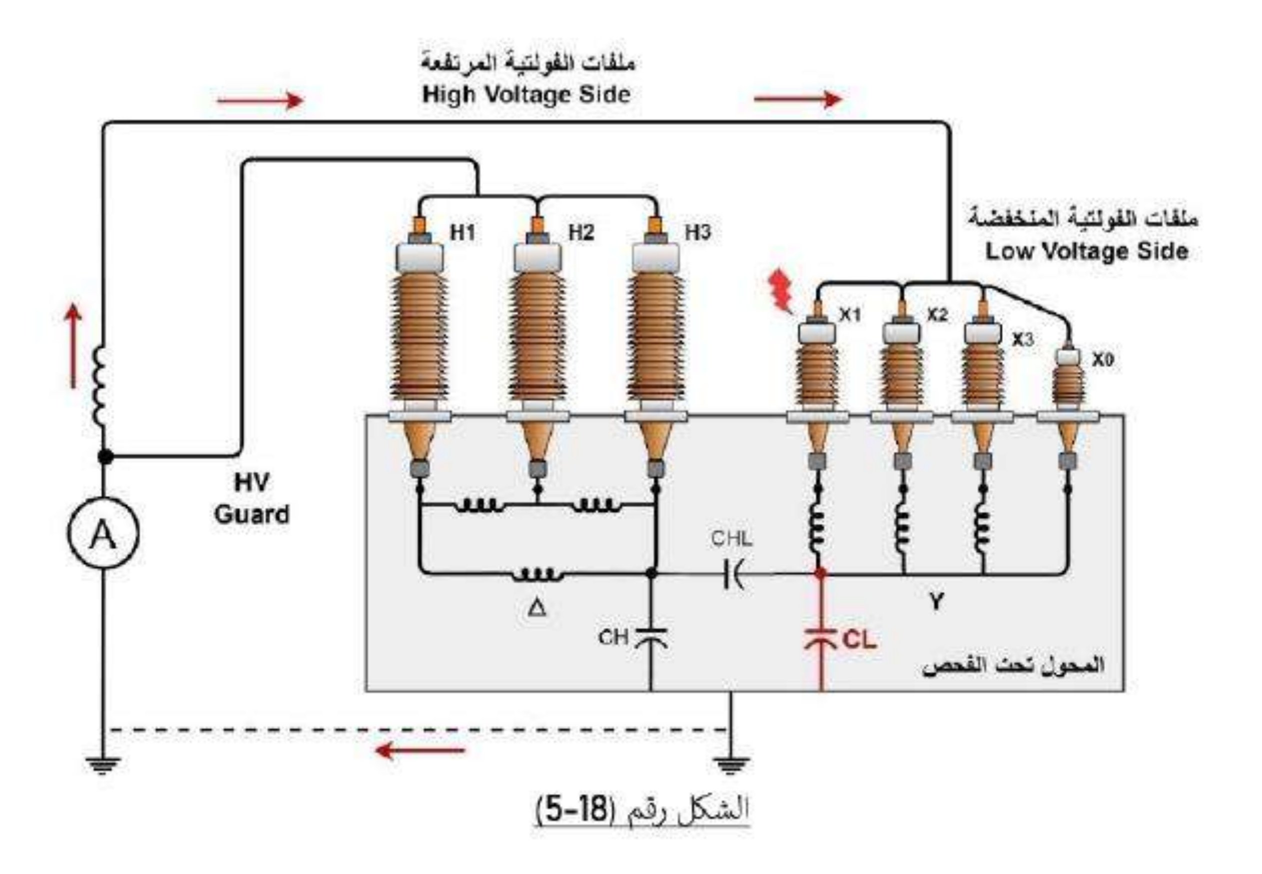
الشكل رقم (5-16)

5.3 عينة فحص مؤرضة مع إزالة تأثير الملفات الأُخرى - Grounded Specimen Test – Guard (GST-Guard)

عادة ما يتم إستخدام هذا الأسلوب للمحولات عند فحص العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة من جهة والأرضي من جهة أُخرى (CH) مع تحييد التيار الراجع من ملفات الفولتية المنخفضة كما هو مبين بالشكل (5-17)، أو عند فحص العزل بين ملفات الفولتية المنخفضة من جهة والأرضي من جهة أُخرى (CL) مع تحييد التيار الراجع من ملفات الفولتية المرتفعة كما هو مبين بالشكل (5-18)، بحيث يتيح هذا الأسلوب التخلّص من التيارات غير المرغوب بها وذلك يتم بتطبيق الفولتية على ملفات الفولتية المرتفعة أو المنخفضة للمحول وقراءة التيار التسرُبي عبر الأرضي فقط.



الشكل رقم (5-17)



الشكل رقم (5-18)

ويُمكن تلخيص توصيلات هذه الأساليب من خلال الجداول التالية وفقاً لنوع المحول فيما إذا كان ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات أو ثلاثي الملفات بالإضافة لعوازل إختراق المحولات (**Bushings**):

- **محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (three phase two windings transformer)**

الجدول (**5-1**) يُبيّن التوصيلة المُناسبة لكل أسلوب من أساليب الفحص مع ذِكر القيمة المُقاسة عند إستخدام هذا الأسلوب للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (**Three phase two winding transformers**).

<u>الجدول رقم (**5-1**)</u>

الفحص	أطراف المحول المشحونة	GST-Ground	GST-Guard	UST	القيمة المُقاسة
1	HV	LV	-	-	CH + CHL
2	HV	-	LV	-	CH
3	HV	-	-	LV	CHL
4	LV	HV	-	-	CL + CHL
5	LV	-	HV	-	CL
6	LV	-	-	HV	CHL

يُمكن إجراء الفحص رقم (**2** و **3** و **5**) وذلك لإستخراج القِيَم التالية (**CH** و **CHL** و **CL**)، كما ويُمكن إجراء الفحوصات (**1** و **4**) وذلك لإستخراج القِيَم (**CH + CHL**) و (**CL + CHL**) والتأكد من القيمة المُقاسة مسبقاً وذلك كالآتي:

$$Test2 = Test1 - Test3 \quad (5.14)$$

$$Test5 = Test4 - Test6 \quad (5.15)$$

- **محول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (three phase tertiary windings transformer)**

الجدول (**5-2**) يُبيّن التوصيلة المناسبة لكل أسلوب من أساليب الفحص مع ذِكر القيمة المُقاسة عند إستخدام هذا الأسلوب للمحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات (**Three phase tertiary winding transformers**).

الجدول رقم (5-2)

القيمة المُقاسة	UST	GST-Guard	GST-Ground	أطراف المحول المشحونة	الفحص
CH + CHL	-	TV	LV	HV	1
CH	-	LV/TV	-	HV	2
CHL	LV	-	-	HV	3
CL + CLT	-	HV	TV	LV	4
CL	-	HV/TV	-	LV	5
CLT	TV	-	HV	LV	6
CT + CHT	-	LV	HV	TV	7
CT	-	HV/LV	-	TV	8
CHT	HV	-	LV	TV	9

يُمكن إجراء الفحص رقم (**2** و**3** و**5** و**6** و**8** و**9**) وذلك لإستخراج القِيَم التالية (**CH** و**CHL** و**CL** و **CLT** و**CT** و**CHT**)، كما ويُمكن إجراء الفحوصات (**1** و**4** و**7**) وذلك لإستخراج القِيَم (**CH + CHL**) و (**CL + CLT**) و (**CT + CHT**) والتأكد من القيمة المُقاسة مسبقاً وذلك كالآتي:

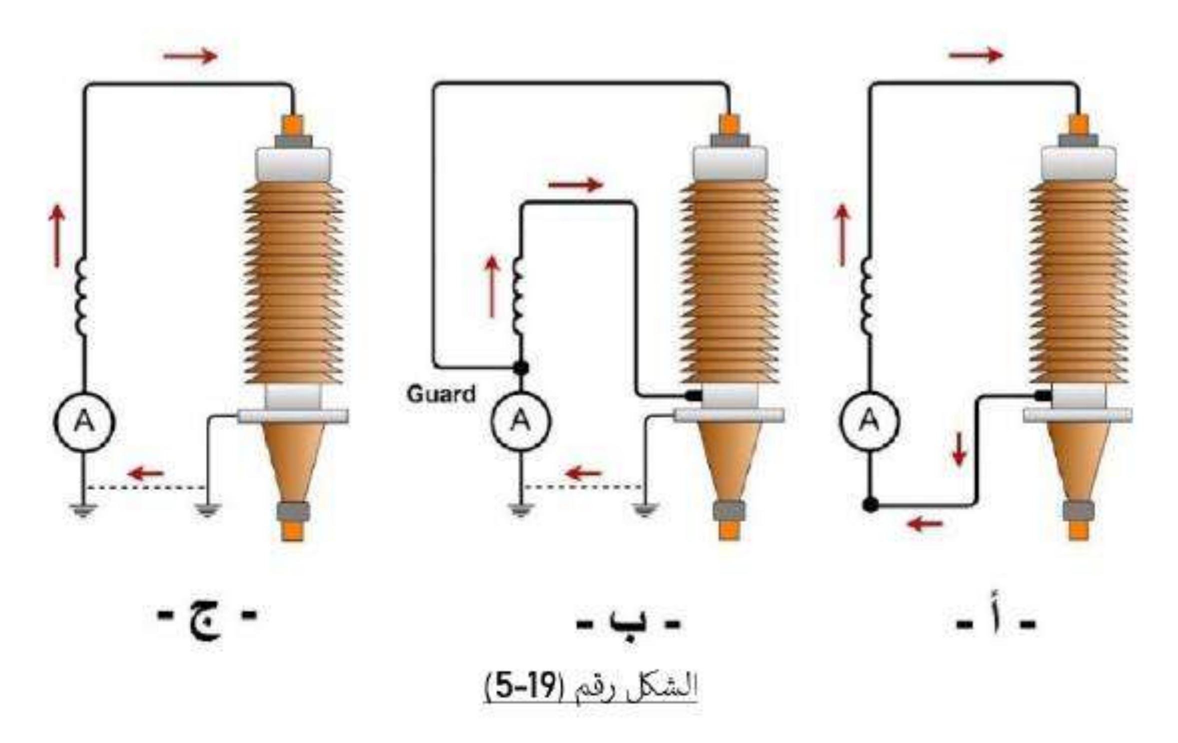
$$Test3 = Test1 - Test2 \quad (5.16)$$

$$Test6 = Test4 - Test5 \quad (5.17)$$

$$Test9 = Test7 - Test8 \quad (5.18)$$

- عوازل الإختراق (**Bushings**)

أما فيما يَخُص عوازل إختراق الفولتية المرتفعة من النوع ذو العزل المُتدرّج (**Capacitive graded bushing OIP or RIP**) فإنه عادةً ما يتم استخدام أسلوب فحص العيّنة غير المؤرضة (**UST**) وتكون التوصيلة كما هو مُبين بالشكل [(**5-19**) (أ)]، حيث أن هذه التوصيلة تهدف للكشف عن المواسعة (**C1**) والتي تُمثل مواسعة العزل الرئيسي (وهي المواسعة بين مأخذ الفحص (**Test tap**) و المُوصل (**Conductor**) أو الإسطوانة الوسطية (**Central condenser**)) الموضحة بالشكل (**5-8**)، وهو غالباً ما يتم فحصه لهذا النوع من عوازل الإختراق بشكل روتيني أو لأسباب تشخيصية. أما المواسعة (**C2**) و التي تمثل المواسعة بين مأخذ الفحص (**Test tap**) والأرضي أو قاعدة التثبيت (**Bushing flange**) تحتاج لتوصيلة أُخرى كما هو مبين في الشكل [(**5-19**) (ب)] وعادة لا يتم إستخراج هذه القيمة لأسباب تشخيصية.



الشكل رقم (5-19)

وفي حال كان عازل الإختراق من النوع الصلب أو ذات العزل غير المُتدرج (**Solid / Ungraded Bushings**) فإن الفحص يتم عادة بإستخدام أسلوب (**GST**) نظراً لعدم وجود مأخذ فحص (**Test tap**)، بحيث يتم الفحص بين المُوصل (**Conductor**) وحافّة عازل الإختراق أو كما تُسمى بقاعدة تثبيت عازل الإختراق (**Bushing Flange**). كما وتَجدُر الإشارة إلى أن إجراء هذا الفحص على هذه الأنواع من عوازل الإختراق (**Bushings**) غير موصى به وذلك لعدم إعطاءه معلومات تفيد في تشخيص حالة العزل لعازل الإختراق.

الجدول (**5-3**) التالي يُبين التوصيلة المناسبة لكل أسلوب من أساليب الفحص مع ذِكر القيمة المُقاسة عند إستخدام هذا الأسلوب لعوازل إختراق المحولات (**Bushings**).

الجدول رقم (5-3)

الفحص	أطراف المحول المشحونة	Ground	Guard	UST	القيمة المُقاسة	ملاحظات
1	Conductor	-	-	Tap	C1	*
2	Tap	Conductor	-	-	C1 + C2	**
3	Tap	-	Conductor	-	C2	**
4	Tap	-	-	Conductor	C1	**
5	Conductor	Flange	-	-	Whole Bushing	*

* عادة ما تكون فولتية الفحص (**10kV**) كيلوفولت.

** عند الفحص بهذه الأساليب عادة ما تكون قيمة الفولتية منخفضة مقارنة بالأساليب الأُخرى، يُرجى الإطلاع على الملحق (**5-2**) لبعض قِيَم الفولتيات المُقترحة.

يُنصح عادة بتطبيق الفحص رقم (**1**) وفي حال كانت نتيجة الفحص غير مُرضية يُمكن تطبيق الفحص رقم (**2**)، كما ويُمكن إجراء الفحوصات (**3** و**4**) في حال كانت نتيجة الفحوصات (**1** و**2**) غير مُرضية وتدُل على وجود عطل بحيث يتم مقارنة نتيجة الفحص رقم (**4**) بالفحص رقم (**1**). وفي حال كانت عازل الإختراق (**Bushing**) غير موصول بالمحول (**Unmounted**) يُنصح بإجراء الفحوصات (**1** و **2** و **5**) معاً.



ملحوظة (5-4): عند إجراء هذه الفحص لعوازل الإختراق (**Bushings**) غير الموصولة بالمحول (**Unmounted**) كتلك الموجد في المستودعات كقطع غيار فإنه يُنصح بوضع عازل الإختراق على دعامة من مادة موصلة مؤرضة وتجنب تركها في صندوقها الخشبي أو فوق دعامات خشبية لتجنب التأثير على نتيجة الفحص وإحتساب الخشب من ضمن مادة العزل المفحوصة.



ملحوظة (5-5): فيما يخُص عوازل الإختراق (**Bushings**) فإنه يُنصح بإجراء فحص يُسمى (**Hot collar test**) في حال كان عازل الإختراق لا يحتوي على مأخذ فحص (**Test Tap**) أو في حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص (**C1**) و (**C2**) بالطريقة الإعتيادية سابقة الذِكر بالإضافة للتأكد من وجود زيت داخل عازل الإختراق في حال كانت بلا مؤشر أو بمؤشر معطل.

6. خطوات الفحص

بعد التعرُّف على فلسفة الفحص وطرُق وأساليب إجراؤه والتوصيلات اللازمة لذلك، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

6.1 عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (**Lock-out Tag-out LOTO**).

6.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أوكما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خِشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

6.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمَّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing]** و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير **[ANSI National Electrical Safety Code]** و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية **[OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]**.

6.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**) وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) وكذلك الحال بنقطة التعادل (**Neutral point**) للمحول إن وجدت.

6.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (**Trapped Charges**) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قِصَر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى التأكد من تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص.



تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (**Earthing Dis-connector**) أو المتنقلة (**Portable**) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines - OHL**) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.

6.6 تنظيف العازل الخارجي لعوازل إختراق المحول (**Bushings**) أمر لا غنى عنه لتجنب التأثير على قيمة الفحص، بالإضافة إلى التفقد البصري (الظاهري) للعزل الخارجي لعازل الإختراق فيما إذا كان هنالك أية ضرر ميكانيكي كالكسر أو الشقوق لحق بهذا العازل أو أي أوضاع غير طبيعية أُخرى.



ملحوظة (6-5): عند إجراء هذا الفحص بشكل روتيني فإنه يُنصح بوضع مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) على الخطوة الأعلى (**Higher tap**) أو الأقل (**Lower tap**).

6.7 تسجيل درجة حرارة المُعدّة المُراد فحصها وذلك بتسجيل:

- ✓ درجة حرارة الزيت العُلوي (**Top oil Temperature**) للمحولات المغمورة بالزيت. وفي حال تعذُّر أخذ هذه القيمة لسبب ما كتعطل المؤشر الخاص بهذه القراءة، يُمكن إحتساب هذه القيمة عن طريق أخذ درجة حرارة خزان المحول (بمنطقة قريبة من حساس درجة حرارة الزيت العلوي) من خلال ميزان حرارة مُلاصق لجدار الخزان مضافاً إليها ثلثي الفرق بين درجة حرارة الخزان وحرارة الهواء المحيط بالمحول في الظل [**Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A**].

مثال: إذا كانت درجة حرارة الخزان من الخارج تساوي (**27°**) درجة مئوية وكانت درجة حرارة الهواء المحيط بالمحول قرابة (**21°**) درجة مئوية فإن قيمة درجة حرارة الزيت العلوي المُحتسبة تساوي:

$$Top\ oil\ temp. = Wall\ temp. + {}^{2}/_{3}\ of\ (Wall\ tem. - Air\ temp.) \qquad (5.19)$$

$$Top\ oil\ temp. = 27 + ({}^{2}/_{3}) . (27 - 21) = 31°C$$

- ✓ القيمة المتوسطة بين درجة حرارة الجو المحيط (**Ambient temperature**) وحرارة الزيت العلوي للمحول عند فحص عوازل إختراق المحولات (**Bushings**) ذات النوع (**Air to oil Bushings**) في حال كانت مُتصلة بالمحول.
- ✓ درجة حرارة الجو المحيط (**Ambient temperature**) لعوازل إختراق المحول (**Bushings**) غير المُتصلة بالمحول أي قبل تركيبها على المحول كتلك الموجودة ضمن قطع الغيار في المستودعات.



ملحوظة (5-7): بالرجوع للمِعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.12.90-2015]** فإنه عند إجراء الفحص يجب أن تكون درجة الحرارة المتوسطة للملفات والزيت محصورة بين (**10° - 40°**) درجة مئوية و يُفضّل أن تكون قريبة من درجة الحرارة (**20°**) درجة مئوية.

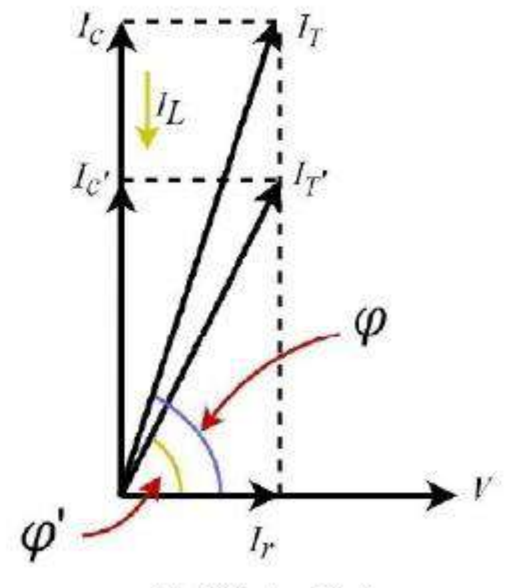


ملحوظة (5-8): يجب تجنُّب إجراء هذا الفحص عند درجة حرارة أقل من درجة التجمد وذلك لأن هذا الفحص يَهدف إلى معرفة مدى رطوبة المادة العازلة وكما هو معلوم فإن خصائص الماء تختلف عند التجمد مما يجعل معرفة نسبتها في العزل صعبة القياس.



ملحوظة (5-9): عند فحص عوازل إختراق المحولات (**Bushings**) من النوع (**OIP**) فإنه يُنصح بأن تكون درجة الحرارة أثناء الفحص مرتفعة حيث أن بعض التجارب أثبتت أنه مع إرتفاع درجة الحرارة تزداد حساسية الفحص إتجاه كمية الرطوبة في المادة العازلة كما ورد في الكُتيب التفصيلي **[ABB, Bushing diagnostics and conditioning, 2750 515-142 en, Rev.1]**.

6.8 قَصر أطراف ملفات الفولتية المرتفعة (**HV terminals short circuit**) وكذلك أطراف ملفات الفولتية المنخفضة (**LV terminals short circuit**)، حيث أنه في حالة عدم قَصر الملفات ينشأ تيار حثي (I_L) والذي بدوره يقوم بإلغاء جزء من التيار السعوي (I_C) كما هو مُبين بالرسم المُتجهي الموضح في الشكل (**5-20**).



الشكل رقم (**5-20**)

من الشكل السابق يُمكن ملاحظة العلاقة الطردية بين قيمة التيار السعوي (I_C) وقيمة الزاوية (φ) التي تقلّ كما قلّ هذا التيار السعوي نتيجة لظهور مركبة التيار الحثي (I_L) سابقة الذِكر مما يؤدي بالمُحصلة لزيادة قيمة معامل التبديد/القدرة المُقاسة.

$$I'_C < I_C$$

$$\varphi' < \varphi$$

$$Cos(\varphi') > Cos(\varphi)$$

عند قصر (**Short circuit**) أطراف الفولتية المرتفعة مع بعضها وكذلك أطراف الفولتية المنخفضة يجب مراعاة أن تكون الأسلاك المُستخدمة لعمل دائرة القِصَر (**Short circuit**) أقصر ما يُمكن وغير مُلامسة لأي أجسام مؤرضة كجسم المحول أو أي نقاط تأريض أُخرى، وأيضاً يجب التأكد من ربط هذه الأسلاك لإبعادها عن الأجسام المؤرضة برباط من مادة عازلة وكذلك التأكد من جفاف ونظافة هذا الرباط.

6.9 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما هو موضح في المُلحقات وفقاً لنوع الجهاز المُستخدم في الفحص وذلك بعد التأكد من تنظيف أطراف المحول التي سيتم التوصيل عليها حتى لا تؤثر على قيمة الفحص كما هو مبين بالمُلحق رقم (**5-1**) عند إستخدام جهاز الفحص (**DELTA by MEGGER**).



ملحوظة (5-10): يجب أن تكون ملفات المحول مغمورة بالزيت عند إجراء الفحص، أي أن لا يكون المحول مُفرغ من الزيت بالإضافة إلى أن تكون عوازل إختراق المحول (**Bushings**) موصولة بالمحول.

6.10 تحديد فولتية الفحص :

يُعتبر فحص معامل التبديد/القدرة وفحص المواسعة من الفحوصات غير التدميرية للعزل، لذلك يجب تطبيق فولتية كهربائية أقل من الفولتية الإسمية للمُعدّة والجدول (**5-4**) التالي يوضح الفولتية المقترحة الواجب تطبيقها خلال هذا الفحص كما ورد في **[Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]**.

<u>الجدول رقم (**5-4**)</u>

فولتية ملفات المحول بالكيلوفولت (kV)	فولتية الفحص المقترحة بالكيلوفولت (kV)
أكبر من **12**	10
أكبر من **5** و أقل أو تساوي **12**	5
أكبر من **2.4** و أقل من أو تساوي **5**	2
أقل من أو تساوي **2.4**	1

وفيما يَخُص محولات التوزيع ذات الملفات الموصولة على شكل نجمة (**Star - Y**) ذات نقطة تعادل مؤرضة يُنصح بعدم تطبيق فولتية فحص أكبر من (**2kV**) كيلوفولت.

ولأسباب تشخيصية فإنه عند إجراء هذا الفحص على مُعدّات يُشتبه تعرُضها للتلف كالمحولات التي تتعرض للفصل القسري (**Trip**) نتيجة لتفعّل مرحلات الحماية بالإضافة للمحولات المُخزنة لفترات طويلة ويشتبه في تعرضها لرطوبة عالية، فإنه يُنصح بتطبيق فولتية مُتدنية نسبياً قرابة الـ(**2KV**) كيلوفولت وفي حال نجاح الفحص يُمكن التصاعد في مقدار الفولتية حتى الوصول لفولتية الفحص المناسبة.

وفي هذا الباب الحديث يطول ويطول لذلك فإن أغلب أجهزة الفحص الحديثة تُتيح إجراء هذا الفحص بإستخدام فولتيات مختلفة وتقوم بتصحيح القيمة المُقاسة لـ(**10kV**) كيلوفولت و(**2.5kV**) كيلوفولت ليتسنى مقارنتها بنتائج الفحوصات المَصنعيّة والمَوقعيّة السابقة لهذا المحول. وللإستزادة في هذا الباب يُمكن إيجاد الجداول المُضمَّنة بالملحق رقم (**5-2**) لبعض قِيَم فولتيات الفحص المقترحة لعوازل الإختراق المختلفة وفقاً لمستوى فولتيتها ونوع عازل الإختراق بالرجوع لأشهر المراجع والمعايير العالمية.

6.11 تحديد أسلوب الفحص وفقاً لنوع المُعدّة المُراد فحصها فيما إذا كانت عازل إختراق (**Bushing**) أو محول ثلاثي الطور ثنائي أو ثلاثي الملفات وذلك بالرجوع إلى فقرة أساليب الفحص.

6.12 بعد تحديد فولتية الفحص و إختيار أسلوب الفحص المناسب وفقاً لنوع المُعدّة المُراد فحصها يتم البدء بالفحص وفقاً للخطوات المبينة في الملحق رقم (**5-1**) الخاص بجهاز الفحص (**DELTA2000**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**).

7. تصحيح القيمة المُقاسة

يُعد هذا الفحص من الفحوصات التي تتأثر قيمتها بتغيُّر درجة حرارة المادة العازلة تحت الفحص والتي تتمثل بحرارة الزيت والملفات للمحولات المغمورة بالزيت كما تم ذكره مُسبقاً، لذلك ولغايات مقارنة القِيَم الناتجة عن هذا الفحص بقِيَم فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) أو المَوقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) أو غيرها من القِيَم المرجعيّة كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (**Routine Test**) لهذا الفحص يُنصح بتصحيح القيمة الناتجة من الفحص الى درجة الحرارة المَرجعية القياسية وهي عادة (**20°**) درجة مئوية. بحيث تتم عملية التصحيح بالإعتماد على معادلات وجداول أوردتها بعض المعايير العالمية والمراجع والنشرات التقنية الصادرة عن الشركات المُصنّعة لأجهزة الفحص أو المحولات وعوازل الإختراق كالآتي:

7.1 معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE)

بالإعتماد على المعادلة (**5.20**) الواردة في المِعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.12.90-2006]** يُمكن تصحيح قيمة معامل القدرة كالآتي:

$$PF_{20} = \frac{PF_m}{k} \quad (5.20)$$

حيث:

PF_{20} : (القيمة المُراد حسابها) قيمة معامل القدرة نسبة لدرجة الحرارة المرجعيّة (**20°**) درجة مئوية.

PF_m : قيمة معامل القدرة المُقاسة.

k :ثابت التصحيح، حيث يُمكن معرفة قيمته بالرجوع إلى الجدول (**5-5**) والخاص بالمحولات ذات نظام العزل المكون من الزيت المعدني (**Mineral oil**).

<u>الجدول رقم (5-5)</u>

معامل التصحيح	درجة الحرارة (C°)
0.80	10
0.90	15
1.00	20
1.12	25
1.25	30
1.40	35
1.55	40
1.75	45
1.95	50
2.18	55
2.42	60
2.70	65
3.00	70

7.2 الكُتيبات التفصيلية الصادرة عن شركة (MEGGER) وشركة (DOBLE)

يُمكن تصحيح قيمة معامل التبديد/القدرة المُقاسة بالإعتماد على المعادلة (**5.21**) الواردة في الكُتيّب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص (**DELTA2000 manual**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**) وكذلك الكُتيب التفصيلي الصادر عن شركة (**Doble**) والخاص بخطوات الفحص **[Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A]** :

$$DF_{20} \; or \; PF_{20} = k \, . \, (DF_m \; or \; PF_m) \quad (5.21)$$

حيث:

DF_{20} : (القيمة المُراد حسابها) قيمة معامل التبديد نسبة للحرارة المرجعية (**20°**) درجة مئوية.

DF_m : قيمة معامل التبديد المُقاسة.

k :ثابت التصحيح، حيث يُمكن معرفة قيمته بالرجوع إلى الملحق رقم (**5-4**).

7.3 النشرات التقنية الصادرة عن شركة (ABB)

وبالرجوع للنشرات التقنية الخاصة بعوازل إختراق المحولات (**Bushings**) من النوع (**OIP** و **RIP**) والمُصنّعة بواسطة شركة (**ABB**) فإنه يُمكن الإعتماد على المعادلة (**5.22**) الآتية في تصحيح قيمة معامل التبديد المُقاسة. **[ABB, Bushing diagnostics and conditioning, 2750 515-142 en, Rev.1]**.

$$DF_{20} = \frac{DF_m}{k} \qquad (5.22)$$

حيث**;**

DF_{20} : (القيمة المُراد حسابها) قيمة معامل التبديد نسبة للحرارة المرجعية (**20°**) درجة مئوية.

DF_m : قيمة معامل التبديد المُقاسة.

k :ثابت التصحيح، حيث يُمكن معرفة قيمته بالرجوع إلى الجدول (**5-6**) والخاص بعوازل الإختراق من النوع (**OIP** و**RIP**).

الجدول رقم (**5-6**)

نطاق درجة الحرارة (°C)	معامل التصحيح لعوازل الإختراق من النوع OIP	معامل التصحيح لعوازل الإختراق من النوع RIP
0 - 2	0.80	0.76
3 – 7	0.85	0.81
8 – 12	0.90	0.87
13 – 17	0.95	0.93
18 – 22	1.00	1.00
23 – 27	1.05	1.07
28 – 32	1.10	1.14
33 – 37	1.15	1.21
38 – 42	1.20	1.27
43 – 47	1.25	1.33
48 - 52	1.30	1.37
53 – 57	1.34	1.41
58 - 62	1.35	1.43
63 – 67	1.35	1.43
68 – 72	1.30	1.42
73 – 77	1.25	1.39
78 – 82	1.20	1.35
83 - 87	1.10	1.29

أثبتت التجارب المختلفة أن التباين في قيمة معامل التبديد/القدرة الناتج عن إختلاف قيمة درجة الحرارة عند الفحص كبير وغير منتظم، لذلك لا يُمكن الإعتماد على منحنى معيّن للتصحيح أو جدول واحد وهذا بدوره يُفسر وجود أكثر من منحنى وجدول للتصحيح. فكما ورد في المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE Std C57.12.90-2015] أنه لا حاجة لتصحيح قيمة معامل التبديد/القدرة المُقاسة وإنما يتم الإكتفاء بذِكر قيمة الفحص إلى جانب درجة حرارة الزيت العلوي (**Top oil temperature**) عند القياس فقط. وبشكل عام فإنه لا حاجة للتصحيح عند فحص المحولات المغمورة بالزيت ذات السِعة (**Capacity**) الأكبر من (**500kVA**) كيلوفولت أمبير عند التردد الإسمي (**50Hz** أو **60Hz**) هيرتز ودرجة حرارة الزيت العلوي (**Top oil temperature**) محصورة بين (**0°** و **30°**) درجة مئوية كما ورد في كتاب **[Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers]**.



ملحوظة (5-11): عند إجراء هذا الفحص لعوازل إختراق المحولات (**Bushings**) من خلال تطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (**Test tap**) فإن القيمة المُقاسة لا تحتاج لتصحيح كما هو الحال عند قياس العزل الرئيسي لعازل الإختراق.

8. تحليل نتائج الفحص

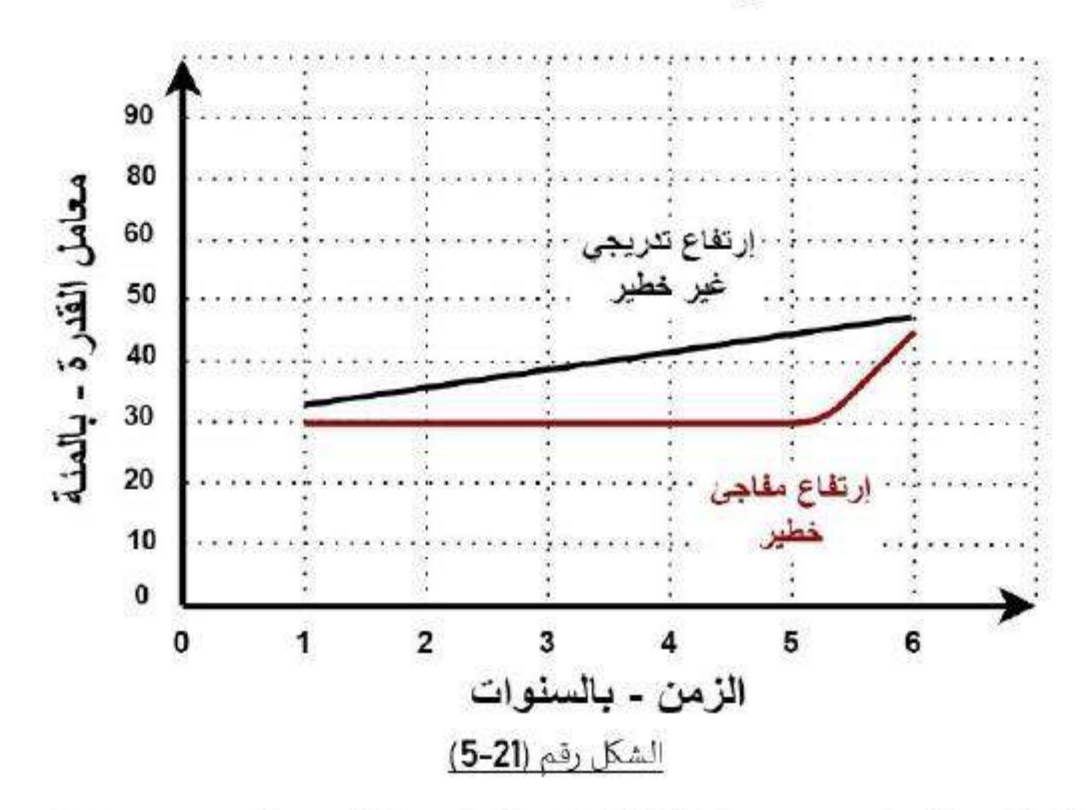
يهدف فحص معامل التبديد/القدرة الى معرفة مدى جودة وكفاءة العزل الكهربائي للمحول وعازل الإختراق (**Bushing**)، وتكون قيمة هذا الفحص على شكل نسبة مئوية من صفر إلى مئة بحيث يدل الصفر على أن مادة العزل نظيفة و جافة و لاتحتوي على فجوات وكذلك خالية من أية دلائل على أن هذه المادة غير قادرة على القيام بالعزل المطلوب.

لذلك وبعد تصحيح القِيَم المُقاسة وفقاً لما تم شرحه في الفقرة السابقة مع التذكير أنها خطوة غير إلزامية حيث أنه ينصح بإجراء هذا الفحص عن درجة حرارة قرابة الـ(**20°**) درجة مئوية، يتم تحليل نتائج الفحص بعدة طرق كالآتي:

8.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص بنتائج سابقة للمُعدّة (نتائج الفحوصات المصنعيّة (**FAT**) أو الموقعيّة (**SAT**) أو الروتينية)، و في حال وجود مجموعة نتائج سابقة يُمكن مقارنة هذه النتائج وتتبع إختلافها مع الزمن (**Trend**).

عند مقارنة نتائج الفحص للمحول أو عازل الإختراق (**Bushing**) بنتائج فحص سابقة لنفس المحول أو عازل الإختراق يجب التأكد من عدم وجود تغيُّر في قيمة معامل التبديد/القدرة أو المواسعة، بحيث أي تغيُّر يستلزم بحث معمق سيتم التحدث عنه لاحقاً بشكل مفصل. ولكن عند مقارنة قيمتين للفحص فقط (حالية و سابقة) فإن تحليل النتائج قد يكون صعب ومضلل، حيث أن نتيجة فحص سابقة واحدة قد لا تكون كافية للكشف عن وجود عطل والجزم بذلك. فكما يظهر بالشكل (**5-21**) هنالك حالتين؛ **الحالة الأولى** لمحول معامل القدرة الخاص به يرتفع بشكل طفيف وتدريجي مع الزمن بشكل غير خطر وهو ما يُمكن ملاحظته بوجود نتيجة فحص سابقة واحدة علماً بأنه دليل على عطل غير خطر، أما **الحالة الثانية**

فهي لمحول معامل القدرة الخاص به ثابت مع الزمن ولكن يرتفع بشكل مفاجئ وخَطِر بعد فترة من الزمن وهو ما لا يُمكن ملاحظته بسهولة في حال كانت هنالك نتيجة فحص سابقة واحدة.



الشكل رقم (5-21)

لذلك كلما كان هنالك نتائج فحص سابقة أكثر كلما زادت كفاءة تحليلها من خلال رسم وتتبع إختلاف قِيَم هذه النتائج مع الزمن (**Trend**).

وكذلك الحال فيما يخُص قيمة فحص المواسعة (**Capacitance**)، حيث أن قيمة التباين المسموح بها هي خمسة بالمئة (**5%**) بالمئة بعد مقارنتها بقيمة الفحوصات المصنعيّة أو الموقعيّة أو الروتينية السابقة كما ورد بالمِعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE, C57.152-2013**]، أما المرجع [**Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers**] فقد حدد قيمة التباين الخاصة بفحص المواسعة (**Capacitance**) بما مقداره (**1%**) بالمئة من قيمة الفحوصات السابقة، وأي قيمة تباين أكبر من ذلك تُعتبر غير مقبولة وتستدعي البحث المُعمّق في أسباب الإختلاف، أما المحولات القديمة (أي الأكبر من **40** عام) فقد تصل قيمة التباين المسموح بها إلى (**2%**) بالمئة.

8.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص بقِيَم مرجعيّة موصى بها عبر المعايير والمراجع العالمية أو من قبل المُصنّعيين (**Manufacturers**).

كقاعدة عامة عادةً ما تكون قيمة معامل القدرة أقل من (**0.5%**) بالمئة عند درجة حرارة (**20°**) مئوية لمنظومة العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة أو بين الملفات والأرضي للمحولات الجديدة، أما فيما يخُص المحولات القديم فإن قيمة معامل القدرة قرابة ال(**1%**) تعتبر نتيجة مقبولة نوعاً ما خاصة في حال لم يَكُن هنالك قِيَم مرجعية مُسبقة، وقد تزيد قيمة هذا الفحص لبعض الحالات الخاصة

كالمحولات القديمة جداً أو كالتي تستخدم عزل الورنيش (**Varnished-cambric**) التي قد يصل قيمة معامل القدرة لها أكثر من (**4%**) بالمئة عند درجة حرارة (**20°**) مئوية.

مما سبق يُمكن تقييم حالة العازل بشكل عام معتمدين أكثر على الخبرة مما يجعل هذا التقييم قليل الدقة، لذلك لا بد من الرجوع للمعاهد واللجان الكهربائية العالمية في هذا الشأن فقد أوردت الكثير من المعايير (**Standards**) و المراجع العالمية بعض القِيَم المرجعيّة لهذا الفحص والتي يُمكن الإعتماد عليها في تقييم حالة المحولات ككل أو عوازل إختراق هذه المحولات (**Bushings**)، ويبقى الخيار متروك لمهندس الفحص في الإعتماد على واحدة أو أكثر من هذه القِيَم المرجعيّة وفقاً للخبرة أو المعايير المعمول بها في المنشأة أو كما هو موصى به من قِبل المُصنعيين (**Manufactures**).



ملحوظة (5-12): كما ذُكر سابقاً فإنه يُمكن التعبير عن نتيجة هذا الفحص بنسبة مئوية أو رقم من واحد لمئة، فإذا ذُكر مثلاً أن معامل القدرة/التبديد (**1%**) فهي نفسها (**100**) وإذا ذُكر (**0.5%**) فهي نفسها (**50**) وهكذا.

✓ المحولات المغمورة بالزيت

عادة لا يتم تضمين قِيَم محددة لهذا الفحص من قِبَل مُصنّعي المحولات في لوحة البيانات الخاصة بالمحول فيما يَخُص المحول ككل وذلك لصعوبة تقييم المادة العازلة بالمحول، ولكن حسب الخبرة فإن قيمة المواسعة لملفات المحول تتراوح من عدة (**nF**) نانوفاراد إلى عدة عشرات من الـ(**nF**)، فبالرجوع إلى المِعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [**IEEE, C57.152-2013**] يُمكن إيجاد الجدول (**5-7**) التالي فيما يخُص القِيَم المرجعيّة لفحص معامل القدرة للمحولات المغمورة بالزيت مُصححة (**Corrected**) لدرجة حرارة (**20°**) درجة مئوية للمحولات ذات الزيت المعدني، أما محولات زيت الإستر فإن القِيَم لم يتم تصحيحها لقلة المعلومات عن هذا الزيت بهذا الخصوص:

الجدول رقم (**5-7**)

نوع زيت المحول	فولتية المحول	الحد الأعلى لقيمة معامل القدرة (للمحولات الجديدة)	الحد الأعلى لقيمة معامل القدرة (للمحولات القديمة)
زيت معدني - **Mineral oil**	< 230	0.5%	1.0%
	≥ 230	0.4%	1.0%
إستر طبيعي - **Natural ester**	All	1.0%	1.0%

أما فيما يَخُص قيمة فحص المواسعة للمحولات فإن ذات المِعيار **[IEEE, C57.152-2013]** أورد القيم المُضمنة في الجدول (**5-8**) التالي:

الجدول رقم (**5-8**)

الإختلاف في قيمة المواسعة المُقاسة	حالة المحول
أقل من **5%**	جيد
5% - 10%	يحتاج لبحث حول أسباب إرتفاع القيمة
أكثر من **10%**	إخراج المحول من الخدمة وإجراء بحث مُعمّق

وكذلك يُمكن إيجاد الجدول (**5-9**) التالي والصادر عن شركة (**MEGGER**) والمُضمّن في الكُتيّب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص (**DELTA2000 Manual**) فيما يخُص نتائج فحص معامل التبديد/القدرة النموذجية للمحولات المغمورة بالزيت.

الجدول رقم (**5-9**)

المحول تحت الفحص	مستوى الفولتية	القيمة النموذجية لمعامل التبديد/القدرة
محول جديد	أكبر من **115** كيلوفولت	**0.25% - 1.0%**
محول قديم (أكبر من **15** سنة)	أكبر من **115** كيلوفولت	**0.75% - 1.5%**
محول توزيع	فولتية منخفضة	**1.5% - 5%**

وأيضاً يُمكن الإعتماد على الجدول (**5-10**) الوارد في المرجع **[Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers]** فيما يخُص تحليل نتائج هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت ذات السعة الأكبر من (**500kVA**) كيلوفولت أمبير.

الجدول رقم (**5-10**)

نتيجة فحص معامل التبديد/القدرة	التقييم
0.2% - 0.3%	مثالي
أقل من **0.5%**	جيد
0.5% - 0.7%	متدهور نوعاً ما
0.5% - 1% ويزداد	يحتاج لبحث
أكثر من **1%**	غير مقبول (لا يجب وضعه بالخدمة)

✓ عوازل الإختراق (**Bushings**)

عادة ما يتم تضمين قِيَم محددة لهذا الفحص من قِبَل مُصنّعي عوازل الإختراق (**Bushings**) في لوحة البيانات الخاصة بها (**Nameplate**) والتي تكون بمثابة مرجع في عملية التحليل، الشكل (**5-22**) يبين نموذج للوحة بيانات عازل إختراق (**Bushing Nameplate**) مُصنّع من قِبَل شركة (**PASSONI VILLA**) الإيطالية والمملوكة حالياً لشركة (**GENERAL ELECTRIC**) الأمريكية.

الشكل رقم (**5-22**)

من لوحة البيانات المُبينة في الشكل السابق يُمكن إيجاد قيمة معامل القدرة (**PF**) وكذلك المواسعة الرئيسية الخاصة بهذا العازل (**C1**) حيث و بالرجوع إلى بعض الكُتيبات التفصيلية (**Manuals**) الخاصة بهذا النوع من العوازل كتلك الصادرة عن إحدى كُبرى الشركات المُصنّعة لعوازل الإختراق كشركة (**ABB**) فإن إختلاف قيمة المواسعة (**C1**) بمِقدار (**3%**) بالمئة عن القيمة المُضمّنة في لوحة البيانات فإنه يدُل على وجود مشكلة أولية في هذا العازل (**Partial puncture**). أما بالرجوع للمرجع **[Paul Gill, Electric Power Equipment Maintenance and Testing]** فإن قيمة التباين المسموح بها عند مقارنة نتيجة المواسعة المفحوصة بقيمة المواسعة المُضمّنة بلوحة البيانات الخاصة بعازل الإختراق هي (**±10%**) بالمئة.

كما وأوردت المعايير العالمية مجموعة من القِيَم المرجعية التي يُمكن الإعتماد عليها في تحليل نتائج هذا الفحص كتلك المعايير الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.19.01-2017]** فيما يخُص الحدود العليا لهذا الفحص بالإضافة إلى قيمة التباين المسموح بها لعوازل الإختراق المُختلفة كما هو مُبين في الجدول (**5-11**) عند درجة حرارة (**20°**) درجة مئوية.

الجدول رقم (**5-11**)

نوع عازل الإختراق	معامل القدرة عند (20°) درجة مئوية		المواسعة
	الحد المسموح به (%)	التغيُّر المسموح به (%)	التغيُّر المسموح به (%)
OIP	0.50	+0.02 / -0.04	±1.00
RIP	0.85	±0.04	±1.00
RBP	2.00	±0.08	±1.00
Cast insulation	1.00	±0.04	±1.00

الجدول (5-12) يُبين الحدود العُليا لفحص معامل التبديد عند تطبيقة على عوازل الإختراق المختلفة كما جاء في المعايير الصادرة عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60137-2017]** و المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **[CIGRE, Guide for Transformer Maintenance 445]** عند درجة حرارة **(20°)** درجة مئوية والتردد الإسمي **(50Hz)** هيرتز أو **(60Hz)** هيرتز.

الجدول رقم **(5-12)**

نوع عازل الإختراق	معامل التبديد (%) عند (20°) درجة مئوية	
	IEC 60137	CIGRE
OIP	< 0.7	0.2 – 0.4
RIP	< 0.7	0.3 – 0.4
RBP	< 1.5	0.5 – 0.6

الجدول **(5-13)** يُبين القِيَم المسموح لفحص معامل التبديد عند تطبيقة على عوازل الإختراق من النوع **(OIP)** و **(RIP)** كما جاء في النشرة التقنية الصادرة عن شركة **(ABB)** المُصنّعة لعوازل الإختراق.

الجدول رقم **(5-13)**

معامل التبديد	التقييم
0 – 25%	جيد
25% - 40%	بحاجة لبحث وإعادة الفحص
40% - 75%	بحاجة لبحث مُعمّق وإعادة الفحص بعد شهر
أكثر من 75%	غير مقبول ويجب إخراج عازل الإختراق من الخدمة

كما وتَجدُر الإشارة إلى مجموعة من القِيَم المرجعية الخاصة بهذا الفحص وفقاً للنوع وللشركة المُصنّعة لعازل الإختراق **(Bushing)** والمُضمن في الملحق رقم **(5-5)** كما ورد في النشرة التقنية **[USBR, Testing and Maintenance of High-Voltage Bushings Vol 3-2]**.

8.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمُعدّة مُشابهة تماماً (**Twin or Sister**).

هذه الطريقة تتم من خلال مقارنة نتائج الفحص المُقاسة بنتائج فحص لمحول مُشابه تماماً بالمواصفات والظروف التشغيلية والبيئة المحيطة أيضاً، على أن لا تتجاوز قيمة التباين القِيَم سابقة الذكر.



ملحوظة (5-13): عند إجراء هذا الفحص وتم ملاحظة إختلاف في قيمة معامل التبديد/القدرة وكذلك المواسعة معاً فإن ذلك يُعد دليلاً على رطوبة المادة العازلة، أما في حال كان الإختلاف فقط بنتيجة فحص معامل التبديد/القدرة فإن ذلك يدل على تدهور المادة العازلة نتيجة للإجهاد الحراري أو تلوثها بمواد أُخرى غير الرطوبة. **[MEGGER, DELTA2000 Device Manual]**

9. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل، ومن هذه العوامل:

9.1 تأثير الكوابل والبسبارات – Effect of cables and busbars

إن إبقاء الكوابل أو مجمعات القضبان (**Busbars**) مُتصلة بعوازل إختراق المحول (**Bushings**) أثناء الفحص قد يؤثر على نتيجة فحص المواسعة، فكما هو معلوم أن المواسعة تعتمد على حجم نظام العزل وبالتالي فإن ترك هذه الكوابل ومجمعات القضبان بالإضافة إلى أي أجزاء أخرى موصولة معها مثل عوازل التثبيت (**Support isolators**) من شأنه زيادة قيمة المواسعة المُقاسة من خلال هذا الفحص خاصة لمُركّبة العزل بين الملفات و الأرض (**CH** و **CL**).

9.2 تأثير زيت المحول – Effect of mineral oil

يجب مراعاة ألا يكون المحول مُفرغ من الزيت عند الفحص بحيث أن قيمة المواسعة تتناسب طردياً مع ثابت العازل (**Dielectric Constant**) الذي يختلف من مادة لأُخرى، إذ أن ثابت العزل الخاص بالهواء أقل من نصف قيمة ثابت العزل الخاص بالزيت لذلك فإن قيمة المواسعة للمادة العازلة داخل المحول المُفرغ من الزيت أقل من قيمة المواسعة للمحول المليء بالزيت.

ومن جهة أُخرى ولأسباب تتعلق بالسلامة فإنه لا يُنصح بإجراء هذا الفحص في حال كان المحول مُفرغ من الزيت خوفاً من وجود غازات قابلة للإشتعال ونتيجة لظهور شرارة قوس كهربائي أثناء الفحص مما قد يتسبب بإنفجار الخزان، وفي حال أردنا إجراء هذا الفحص على المحول وهو مُفرغ من الزيت يجب تطبيق فولتية منخفضة إي قرابة الـ(**10%**) بالمئة من فولتية الفحص الإعتيادية بالإضافة إلى التأكد من أن الهواء داخل خزان المحول لا يحتوي على غازات قابلة للإحتراق وذلك عن طريق حقن غاز النيتروجين الجاف عوضاً عن الهواء لتقليل نسبة غاز الأوكسجين إلى أقل من (**2%**) بالمئة، وبالإضافة إلى ذلك فإنه يُمنع إجراء عذا الفحص في حال كان الضغط الداخلي لخزان المحول أقل من الضغط الخارجي أي أن المحول مُفرغ من الهواء أيضاً (**Under Vacuum**).

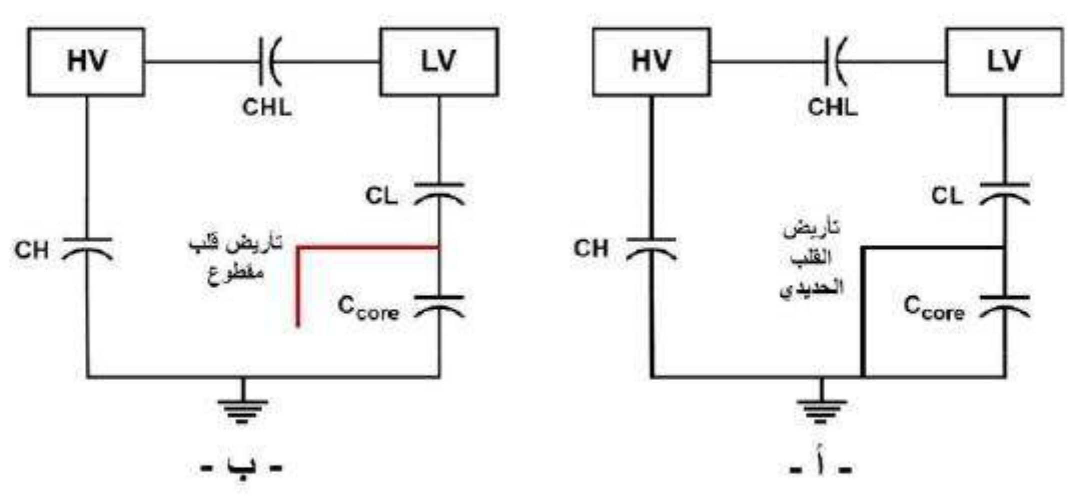
الجدول (**5-14**) يُبين بعض قِيَم فولتيات الفحص عند إجراء هذا الفحص على المحولات المُفرغة من الزيت مع الحذر الشديد كما ورد في الكُتيب التفصيلي الخاص بخطوات الفحص **[Doble Test Procedure, 72A-2244 rev.A]** الصادر عن شركة (**Doble**):

الجدول رقم (5-14)

توصيلة ملفات المحول	الفولتية الإسمية لملفات المحول بالكيلوفولت (Line to Line kV)	فولتية الفحص المُقترحة بالكيلوفولت (Line to Ground kV)
مثلث (Delta – Δ) أو نجمة (Star – Y) غير مؤرضة	أكثر من أو يساوي 161	10
	115 - 138	5
	34 – 69	2
	12 - 25	1
	أقل من 12	0.5
نجمة (Star – Y) مؤرضة أو آحادي الطور مع نقطة تعادل	أكثر أو يساوي 12	1
	أقل من 12	0.5

9.3 تأثير فقدان تأريض القلب الحديدي – effect of loss of core ground

كما تم شرحه في الفصل الأول فإنه يتم تأريض القلب الحديد للمحول وذلك للتخلُّص من التيارات الدوارة وما ينتج عنها من إحماء، وعند إجراء هذا الفحص يجب التأكد أن القلب الحديدي موصول بالأرض تَجنُّباً لتأثيره على قيمة المواسعة المُقاسة، فكما هو مُبين بالشكل (5-23) عندما يكون القلب الحديدي غير موصول بالأرض تُضاف مواسعة القلب الحديدي للأرض (C_{core}) على التوالي مع مواسعة ملفات الفولتية المنخفضة والأرض (CL) مما يعني قيمة مواسعة مكافئة أقل من الحقيقية.



الشكل رقم (5-23)

في الشكل [(5-23) (أ)] تُشكّل وصلة التأريض دائرة قِصَر (SC) على مواسعة القلب لذلك لا تؤثر قيمة هذه المواسعة على قيمة مواسعة ملفات الفولتية المنخفضة (CL)، أما في حال وجِد قطع بالأرضي الخاص

بالقلب الحديدي فإن مواسعة القلب (C_{core}) تكون على التوالي مع مواسعة ملفات الفولتية المنخفضة (**CL**) مما يفسر ظهور مواسعة مكافئة ($C_{eq.}$) أقل من قيمة (**CL**) المطلوبة.



ملحوظة (14-5): كما وتّجدُر الإشارة إلى أنه في حال ترك نقطة التعادل (**Neutral**) الخاص بملفات الفولتية المنخفضة موصولة بالأرض أثناء الفحص سيؤثر ذلك على قيمة المواسعة (**CHL**) المُقاسة.

9.4 تأثير عوازل الإختراق على نتيجة الفحص – Effect of bushings

بالرجوع الى ما تم شرحه مسبقاً فإن قيمة معامل التبديد/القدرة هي قيمة متوسطة وعامة، لذلك عند فحص المحولات ككُل فإن عوازل الإختراق (**Bushings**) الموصولة بالمحول تؤثر على الفحص إما بزيادة قيمة معامل التبديد/القدرة أو بإنقاصه كالآتي:

- في حال كانت عوازل إختراق المحول ذات قيمة معامل قدرة مُتدني وملفات المحول كانت قيمة معامل القدرة لها مقبولة، فإن النتيجة النهائية للفحص قد تكون مُتدنية نتيجة لتأثير عوازل الإختراق على الفحص، مما يُعطي إنطباع أن المحول ككُل ذو قيمة معامل قدرة غير مقبولة وهذا غير صحيح حيث أن الملفات سليمة ولكن المشكلة بعوازل الإختراق فقط.
- في حال كانت ملفات المحول ذات قيمة معامل قدرة مُتدني وعوازل إختراق المحول (**Bushings**) كانت قيمة معامل القدرة لها مقبولة، فإن النتيجة النهائية للفحص قد تكون مُتدنية نتيجة لتأثير الملفات على الفحص، مما يُعطينا إنطباع أن المحول ككُل ذو قيمة معامل قدرة غير مقبولة وهذا غير صحيح حيث أن عوازل الإختراق سليمة ولكن المشكلة بالملفات. وتكمُن المشكلة الرئيسية في حال أن عوازل الإختراق السليمة أثرت على الفحص وجعلته مقبولاً ككُل مما يعيق الكشف عن وجود مشكلة بعزل الملفات.

في هذه الحالة وللتخلص من تأثير قيمة معامل القدرة الخاص بعوازل الإختراق (**Bushings**) على قيمة معامل القدرة للملفات، فإنه يتم اللجوء إلى طرح تأثير عوازل الإختراق وذلك بإتباع الخطوات التالية في حال أردنا إزالة تأثير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (**HV Bushings**) على ملفات الفولتية المرتفعة للمحول (**CH**):

- ✓ قياس قيمة معامل القدرة لمُركّبة العزل الرئيسي (**C1**) لجميع عوازل الإختراق حتى الخاصة بنقطة التعادل في حال كانت الملفات موصولة على شكل نجمة (**Star – Y**).
- ✓ تسجيل قيمة التيار (**Current**) بالملي أمبير وكذلك قيمة الخسائر بالقدرة (**Watt loss**) بالواط لجميع عوازل الإختراق.
- ✓ جمع قيمة التيار لعوازل الإختراق جميعها وكذلك قِيَم الخسائر في القدرة (**Watt loss**).
- ✓ قياس قيمة معامل القدرة للمحول ككُل (مع عوازل الإختراق).
- ✓ تسجيل قيمة التيار (**Current**) بالملي أمبير و كذلك قيمة الخسائر في القدرة للمحول ككُل.

- ✓ طرح قيمة التيار الكُلي لعوازل الإختراق من قيمة التيار الكُلي للمحول.
- ✓ طرح قيمة الخسائر في القدرة الكُلية لعوازل الإختراق من قيمة الخسائر في القدرة للمحول ككُل.
- ✓ حساب قيمة معامل القدرة للملفات لوحدها بالإعتماد على قيمة التيار وخسائر القدرة المحتسبة على إعتبار أن الفحص تم على (**10kv**) كيلوفولت وفقاً للمعادلة التالية.

$$PF\% = \frac{Watt\ loss}{Test\ voltage\ x\ leakage\ current}\ x100 \qquad (5.23)$$

الجدول (**5-15**) يوضح مثال على طرح تأثير عوازل الإختراق على القيمة الكُلية لمعامل القدرة للمحول، على إفتراض أن القيمة المُقاسة لمعامل القدرة للمحول هي (**0.48%**) بالمئة وأردنا إزالة تأثير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (**HV Bushings**).

الجدول رقم (**5-15**)

المواسعة الكُلية لعازل الإختراق (C1)	التيار المُتسرب	خسائر العازل (watts)	قيمة معامل القدرة المُحتسبة (%)
H1	2.72	0.204	0.75
H2	2.61	0.155	0.59
H3	2.62	0.277	1.06
H0	2.60	0.092	0.35
مجموع تأثير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة	10.55	0.728	-
CL	46.14	2.21	0.48
CL بعد طرح تأثير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة	35.59	1.482	0.42

من الجدول السابق يُمكن ملاحظ تَحسُن قيمة معامل القدر للمحول بعد إزالة تأثير عوازل الإختراق على قيمة فحص معامل القدرة للمحول، حيث أن قيمة معامل القدرة للمحول ككُل كانت (**0.48%**) بالمئة وأصبحت (**0.42%**) بالمئة.

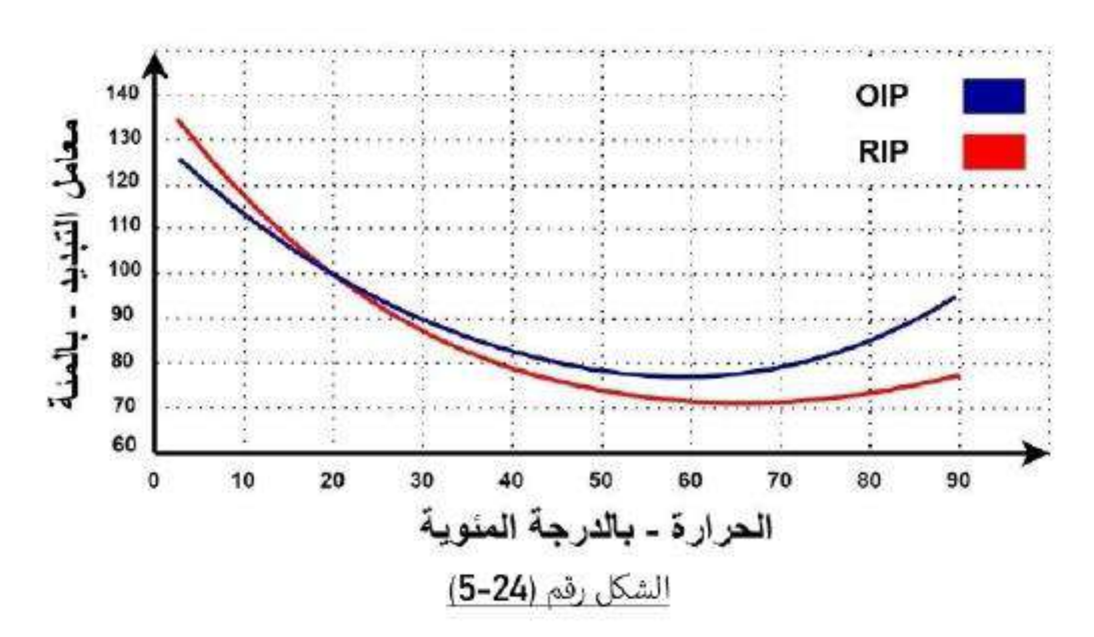
9.5 تأثير إستبدال عوازل الإختراق أو زيت المحول – Effect of bushings or oil changing

كما هو معلوم أن عوازل الإختراق و زيت المحول تُعد من المكونات الرئيسية لمنظومة العزل، لذلك عند إستبدال عازل إختراق قديم بواحد آخر جديد ذو أبعاد هندسية ومنظومة عزل مختلفة عن عازل الإختراق القديم، فإنه من المؤكد الحصول على نتيجة فحص مُتباينة عن سابقاتها من النتائج، وفي هذه الحالة يجب الإكتفاء بإجراء هذا الفحص من جديد وحفظ نتيجته كقيمة مرجعية للفحوصات القادمة.

وكذلك الحال فيما يخُص زيت المحول فإنه في حال إستبدال زيت المحول بزيت جديد معدني أو سيليكوني أو طبيعي كالإيسترات أو غيرها من الزيوت فإنه من المؤكد الحصول على نتيجة فحص مُتباينة عن سابقاتها من النتائج، ويَعود السبب بذلك لإختلاف ثابت العزل (**Dielectric constant**) لهذه الأنواع عن بعضها البعض.

9.6 تأثير درجة الحرارة – Effect of temperature

كما ذُكر سابقاً فإن خسائر المادة العازلة تتأثر بدرجة الحرارة، حيث أن التغيُّر المُفاجئ لدرجة حرارة الجو المحيط (**Ambient temperature**) والذي سوف يُصاحبه تغيُّر في درجة حرارة المحول أو عازل الإختراق (**Bushing**) سيؤثر على قيمة معامل التبديد/القدرة، الشكل (**5-24**) يوضح إختلاف قيمة معامل التبديد باختلاف درجة الحرارة لعوازل الإختراق من النوع (**OIP** و **RIP**).



الشكل رقم (**5-24**)

ومنه فإنه لا يُنصح بإجراء هذا الفحص في درجة حرارة جو محيط (**Ambient temperature**) أقل من درجة حرارة تَكوّن قطرات الندى (**Dewpoint temperature**)، حيث أنه لو إفترضنا وجود شق (**Crack**) في سطح المادة العازلة الخارجي وكان هنالك ماء في هذا الشق وكما هو معلوم فإن الماء تحت درجات تَكوّن قطرات الندى يَكون قد تحول لجليد، وهذا الجليد تختلف خصائصه تماماً عن الماء وأهمها فقدانه للموصلية الكهربائية حيث أن مقاومته الحجمية (**Volumetric Resistivity**) أي مقاومته لمرور التيار التسرُبي من خلاله أكبر قرابة الـ(**144**) مرة من الماء مما يعني ظهور نتيجة فحص مُرضية ولا تعكس الحالة الحقيقية للمادة العازلة.

لذلك ولتجنب تأثير درجة الحرارة فإنه يُنصح بالآتي:

- ✓ إجراء هذا الفحص في أوقات مُتأخرة من الصباح إلى منتصف الظهيرة لتجنُب درجات الحرارة المُتدنية وما ينتج عنها من تأثير على نتيجة هذا الفحص، أو تأجيل الفحص ليوم آخر مُشمس وصافي في حال لم تتوفر الشروط المناسبة.
- ✓ إجراء الفحص بعد فصل المحول مباشرة أي قبل نزول درجة حرارة المحول.
- ✓ تغطية المحول وتسليط هواء ساخن لرفع درجة حرارته قبل الفحص.

9.7 تأثير تيار التسرُب السطحي – Effect of Surface Leakage Current

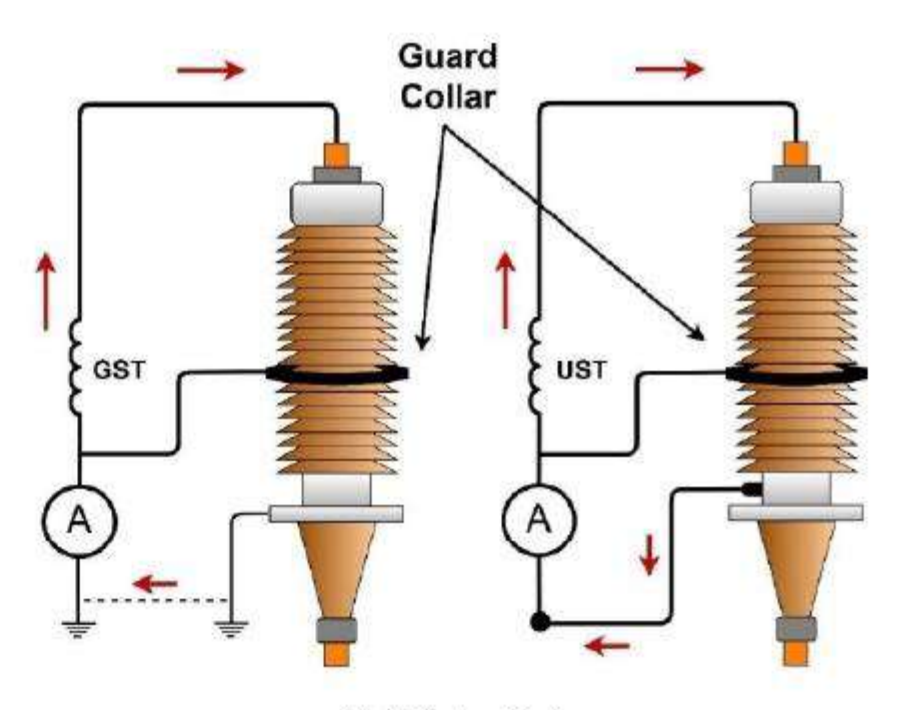
إن أغلب محولات القدرة المغمورة بالزيت عادةً ما تكون بالخارج (**Outdoor**) مما يعني تعرضها للعوامل الجوية الخارجية ومن أهم هذه العوامل الحرارة بالإضافة للرطوبة والملوثات كالغبار وغيره من الملوثات، لذلك يجب الأخذ بعين الإعتبار هذه العوامل عند إجراء هذا الفحص خاصة وأنها جميعها تؤثر على نتيجة هذا الفحص بطريقة أو بأُخرى، فمثلاً درجة الحرارة من شأنها تغيير خصائص المادة العازل الكهربائية مما يؤدي للتأثير على قيمة هذا الفحص كما تم شرحه سابقاً و للتقليل من تأثير درجة الحرارة على الفحص هنالك طُرق لتصحيح القيمة المُقاسة كتلك المذكورة في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة، ولكن التحدي الأكبر هو التخلّص من تأثير الرطوبة حيث أنه لا يوجد معامل تصحيح خاص بالرطوبة أي أنه لا يُمكننا تصحيح قيمة معامل التبديد/القدرة المُقاسة عند درجة رطوبة معيّنة.

ولكن قبل الخوض في الأمور الواجب مراعاتها للتخلص من تأثير الرطوبة لا بُد لنا من معرفة كيف تؤثر الرطوبة على قيمة معامل التبديد/القدرة؛ إن زيادة مستوى الملوثات على سطح العازل بالإضافة لزيادة نسبة الرطوبة الجوية فإنه ينشأ تيار تسرُبي على سطح العازل (البورسلان الخارجي لعوازل الإختراق على سبيل المثال) من شأنه التأثير على نتيجة الفحص ولكن بضوابط مُعينة ووفقاً لإعتبارات كثيره منها:

- ✓ عند إجراء هذا الفحص بأسوب العيّنة غير المؤرضة (**UST**) فإن تأثير هذه التيارات التسرُبية يُمكن إهمالها على النقيض من الفحص بأسلوب العيّنة المؤرضة (**GST**).
- ✓ عند إجراء هذا الفحص على مُعدات ذات مواسعة كبير كمحولات القدرة على النقيض من المُعدات ذات المواسعة الأقل كعوازل الإختراق (**Bushings**) وحارفات الصواعق (**Surge Arrestor**) وذلك لأن الضياعات في القدرة كبيرة لمحولات القدرة مما يجعل الخسائر الناتجة عن التيارات التسرُبية مهملة ولا تؤثر على قيمة الفحص.
- ✓ لا خوف على المحولات وعوازل إختراقها من هذه التيارات التسرُبية حيث أن المحولات عادة ما تكون حرارتها مرتفعة مما يقلل رطوبة سطحها حيث أن الرطوبة الجوية لا تتكثف على الأسطح الدافئة وهذا بدوره يقلل قيمة التيارات التسربية.
- ✓ إذا كان سطح العازل نظيف فإن رطوبة سطح العازل لا تُشكّل عائقاً لإجراء الفحص نظراً لتأثيرها المُهمل.

لذلك وللتخلُّص من تأثير هذه التيارات التسرُبية يُمكن إتباع الآتي:

- ✓ تنظيف سطح العازل (البورسلان الخارجي لعوازل الإختراق عادة) مما يُقلل من الضياعات.
- ✓ إجراء الفحص أثناء رطوبة جوية مناسبة علماً بأن نسبة الرطوبة (**70% - 50%**) بالمئة تُعتبر متوسطة وأكثر من (**70%**) بالمئة تُعتبر مرتفعة كقاعدة عامة.
- ✓ إستخدام الـ(**Guard Collars**) على حلقات العازل السفلية قدر الإمكان (**Bottom Skirt**) لتحييد قيمة تيارات التسرُب السطحي كما هو مُبين بالشكل (**5-25**).



الشكل رقم (5-25)

هنالك العديد من العوامل التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص غير العوامل المذكورة سابقاً والتي تُعدّ الأكثر شيوعاً، فبالرجوع إلى كتاب **[Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]** يُمكن إيجاد جدول يَضُم الأمور التي تؤثر على قيمة فحص معامل التبديد/القدرة والتي تم تضمينها في الملحق **(6-5)** وكذلك الأمور التي من شأنها إحداث تغيير على قيمة المواسعة المُقاسة والتي تم تضمينها بالملحق **(7-5)**.

10. مواطن العجز في هذا الفحص

فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة الخاص بالمواد العازلة ورغم إنتشاره بشكل واسع وكذلك إعتماده من قبل اللجنة الكهروتقنية الدولية **(IEC)** كأحد الفحوصات المَصنعيّة الموصى بها، إلا أنه يُعاني من القصور في بعض المواطن كما هو مُبين بالنقاط التالية:

10.1 معامل التبديد/القدرة - dissipation/Power Factor DF&PF

- **قيمة معامل التبديد/القدرة قيمة متوسطة (Average):**

عند اجراء فحص معامل القدر للمادة العازلة فإننا نقوم بقياس الحالة المتوسطة **(Average condition)** للمادة العازلة تحت الفحص، مما يعني وجود مشكلتين أساسيتين :

✓ **صعوبة الرؤية** : عند فحص مادة عازلة وعلى فرض أنها مُقسّمة إلى خمسة أقسام، فإن قيمة معامل القدرة لهذه المادة تُعبّر عن الحالة المتوسطة **(Average Condition)** لهذه المادة كَكُل، مما يعني أنه لو كان معامل القدرة **(0.2%)** بالمئة للمناطق الأربعة الأولى ويساوي **(1.5%)**

للمنطقة رقم خمسة فإن القيمة المتوسطة لمعامل القدرة تساوي (**0.46%**) بالمئة و هي قيمة مقبولة نوعاً ما، لذلك لن يتم رؤية مشكلة العازلية الموجودة في المنطقة رقم خمسة من العازل ذات قيمة معامل القدرة المساوي ل(**1.5%**) بالمئة.

- ✓ **صعوبة التميز** : بالرجوع للمثال السابق فإن قيمة معامل القدرة الكُلية المساوية ل(**0.46%**) بالمئة تعني وجود إحتمالين؛ **الإحتمال الأول** أن يكون العازل كُله قد تقادم، أي أن المناطق الخمسة قيمة معامل القدرة لها (**0.46%**) بالمئة، **والإحتمال الثاني** أن منطقة واحدة فقط ضعيفة (**1.5%**) بالمئة و باقي المناطق وضعها سليم (**0.2%**) بالمئة، لذلك فإن القيمة المتوسطة لمعامل القدرة حالت بيننا وبين معرفة فيما إذا كانت المشكلة تَخُص العازل كُل أو أنها تَخُص منطقة محددة من العازل فقط.

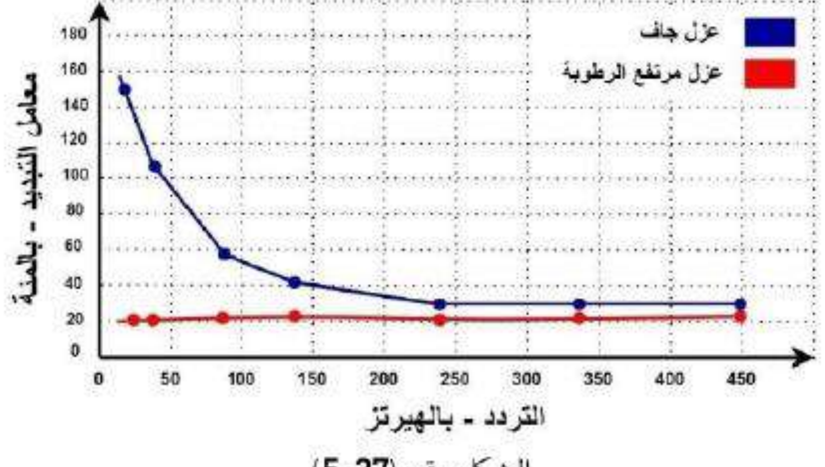


الشكل رقم (**5-26**)

- تردد الفحص:

في هذا الفحص يتم قياس معامل التبديد/القدرة عند التردد الإسمي للمحول، وهناك الكثير من البحوث أكدت وجود مجموعة من مشاكل العازل لا يتم كشفها إلا عند الترددات المنخفضة (**15 Hz**) أو الترددات المرتفعة (**400 Hz**)، وأن المنطقة الأقل حساسية هي منطقة التردد الإسمي (**50/60Hz**) ولذلك عادةً ما تُسمى بالنقطة العمياء (**Blind spot**).

الشكل (**5-27**) يُبين تأثير تردد الفحص على قيمة معامل التبديد لعوازل إختراق الفولتية المرتفعة من النوع (**OIP**) وفقاً لما تم نشره في بحث [**CIGRE, Guide for Transformer Maintenance 445**] والذي يُظهر حساسية هذا الفحص عند الترددات القليلة مما يجعله ذو كفاءة أكبر في الكشف عن المشاكل المُتعلقة بالعزل.



الشكل رقم (**5-27**)

لذلك يُنصح بإجراء هذا الفحص عند أكثر من تردد وهو ما يُسمى بفحص (**Variable Frequency Power Factor test - VFPF**) وكذلك إجراء هذا الفحص أثناء عزل المحول (**Offline**) مما يُتيح إختيار قيمة تردد الفحص المناسبة، وهذا بدوره لا يُقلل من شأن هذا الفحص الـ(**Online rated frequency PF test**) ولكن يُشير إلى قلة حساسيتها وكفاءتها في الكشف عن المشاكل في المادة العازلة.

- **ضرورة وجود قيمة مرجعيّة (نتائج فحوصات سابقة):**

في حال عدم وجود قِيَم مرجعيّة فإن كفاءة تحليل نتائج هذا الفحص وإحتمالية الكشف عن وجود الأعطال في المادة العزلة تقلّ، فإن أهمية وجود القِيَم المرجعيّة تكمُن في القدرة على المقارنة وتتبع تقادم المادة العازلة والكشف عن أية مشاكل أخرى قد تلحق بالمادة العازلة كإرتفاع نسبة الرطوبة أو وجود أضرار فيزيائية لحقت بهذه المادة العازلة.

10.2 المواسعة الكهربائية – Capacitance

- قيمة المواسعة الكهربائية ذات حساسية عالية لدرجة الحرارة، أي يجب مراعاة إختلاف درجات الحرارة بين القراءات السابقة والحالية عند مقارنتها وتحليلها.
- قيمة المواسعة الكهربائية حساسة بشكل كبير للتشوّه الملفات، مما يعني أن أي تغيُّر طفيف في قيمة المواسعة قد يعني وجود تغيُّر فيزيائي كبير للمادة العازلة لذلك يجب أخذه بعين الإعتبار وعدم إهماله.
- ضرورة وجود قيمة مرجعيّة (نتائج فحوصات سابقة أو قِيَم مُثبتة على لوحة البيانات لغايات المقارنة).

11. فحوصات إضافية داعِمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أُخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص وتحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنِّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص معامل التبديد/القدرة و المواسعة (**DF/PF** و **Capacitance**) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تجنُّب الأمور التي قد تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفيما يَخُص عوازل الإختراق فكما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60137-2017]** فإن يجب الإنتظار لمدة ساعة قبل إعادة الفحص مع ضرورة تسجيل درجة الحرارة. وفي حال الحصول على نتيجة أخرى غير مُرضية، لا يُنصح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأُخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها كالآتي:

- معامل التبديد/القدرة
  - فحص معامل القدرة بتردد متغيّر (Variable Frequency Power Factor – VFPF)
  - فحص معامل القدرة بفولتية متدرجة (Stepped Voltage Power Factor or PF Tip-Up)
  - فحص الإستجابة الترددية للمادة العازلة (Dielectric Frequency Response – DFR)
  - فحص الغازات الذائبة في الزيت (Dissolved Gas Analysis – DGA)

- المواسعة
  - فحص مُفاعلة التسرُب (Leakage Reactance)
  - فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (Frequency Response Analysis FRA)

12. أمثلة على نتائج فحوصات مَصنعيّة

12.1 المثال الأول: الشكل (5-28) يُبين قِيَم فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة مَصنعي (FAT) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three Phase Two Winding) موصول بطريقة (YNd11) ذو مُغيّر خطوة من نوع (DETC or OCTC).

Acceptance
Test Certificates

Customer :	A.C. INSULATION TESTS	Page No :
		Serial No :
	Standard : IEC 60076-1§10.1.3b) & i)	Report No. :
Rated Power(MVA): 100 / 135	Rated Voltage(kV): 420 / 15	Vector Group: YNd11
Object temperature : 27 °C	Relative humidity : 58 %	Ambient temperature : 23 °C
Weather :	Rated Frequency : 50 Hz	Test Frequency: 50 Hz

OVERALL TESTS

Measurements					Equivalent 10 kV readings								Power factor (%)		
					Current measurement				Loss measurement						
Test No	Energized	Grounded	Guarded	Test voltage (kV)	Reading	Reading	Multiplier	mA	Reading	Reading	Multiplier	Watt	Measured	20°C	Capacitances (pF)
1	HV	LV		10	38	38	1	38	4	4	0,2	0,8	0,22	0,16	C_H+C_{HL}= 11791
2	HV		LV	10	85	85	0,2	17	3	3	0,1	0,3	0,19	0,13	C_H= 5481
3	LV	HV		10	76	76	1	76	8	8	0,2	1,7	0,22	0,16	C_L+C_{HL}= 24591
4	LV		HV	10	56	56	1	56	6	6	0,2	1,2	0,22	0,16	C_L= 18271
5	HV	LV-UST		10	98	98	0,2	19	4	4	0,1	0,4	0,22	0,16	C_{HL}= 6321
6	HV LV	LV cable Ground		10	74	74	1	74	8	8	0,2	1,6	0,21	0,15	C_H+C_L= 23791

BUSHING TESTS

Measurements			Equivalent 10 kV readings								Power factor(%)		
			Current measurement				Loss measurement						
Phases	Serial No:	Test voltage (kV)	Reading	Reading	Multiplier	mA	Reading	Reading	Multiplier	Watt	Measured	20°C	Capacitances (pF)
H1		10	90	90	0,02	1,81	7	6	0,01	0,066	0,38		C1= 581
H2		10	91	91	0,02	1,82	7	6	0,01	0,070	0,38		C1= 580
H3		10	90	90	0,02	1,80	7	6	0,01	0,070	0,39		C1= 578
H0		10	66	66	10	0,6	15	15	0,002	0,031	0,47		C1= 215
X1		10	60	60	0,02	1,21	3	3	0,01	0,032	0,26		C1= 385
X2		10	62	62	0,02	1,24	3	3	0,01	0,037	0,30		C1= 393
X3		10	61	61	0,02	1,23	3	3	0,01	0,037	0,30		C1= 392

الشكل رقم (5-28)

12.2 المثال الثاني: الشكل **(5-29)** يُبين قِيَم فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة مَصنعي **(FAT)** لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات **(Three Phase Tertiary Winding)** موصول بطريقة **(YNd11-d11)** ذو مُغيّر خطوة من نوع **(OLTC)**.

Measurement of (tan δ) dissipation factor of the insulation system capacitances					
Relative humidity :10%		Atmospheric pressure:0.095MPa		Oil temperature:16 ℃	
Measured sequence and data between each winding to earth					
Tested winding	Earthing parts	Test voltage (kV)	Capacitance value (pF)	Dielectric dissipation factor tan δ at 20℃ (%)	Test method
HV	Other winding, core, frame and tank enclosure	10	10990	0.25	Method of opposite wiring
LV1		10	12280	0.27	
LV2		10	11780	0.25	
HV + LV1		10	18570	0.38	
HV + LV1 + LV2		10	24210	0.33	
Measured sequence and data between windings					
HV to LV1	Other winding, core, frame and tank enclosure	10	2355	0.23	Method of Positive wiring
HV to LV2		10	2259	0.21	
LV1 to LV2		10	807.7	0.29	
Test results	The measured values dissipation factor of meet the relevant requirements.				

الشكل رقم **(5-29)**

الملحق (1-5)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة بإستخدام جهاز DELTA2000 10kV by MEGGER





الشكل رقم (1-1-5)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(DELTA2000 manual)
  - فولتية المدخل الإسمية : **230 V, 50 Hz**
  - نطاق فولتية المخرج : **0** إلى **12kV**
  - نطاق القياسات : حسب الجدول التالي.

الجدول رقم (5-1-1)

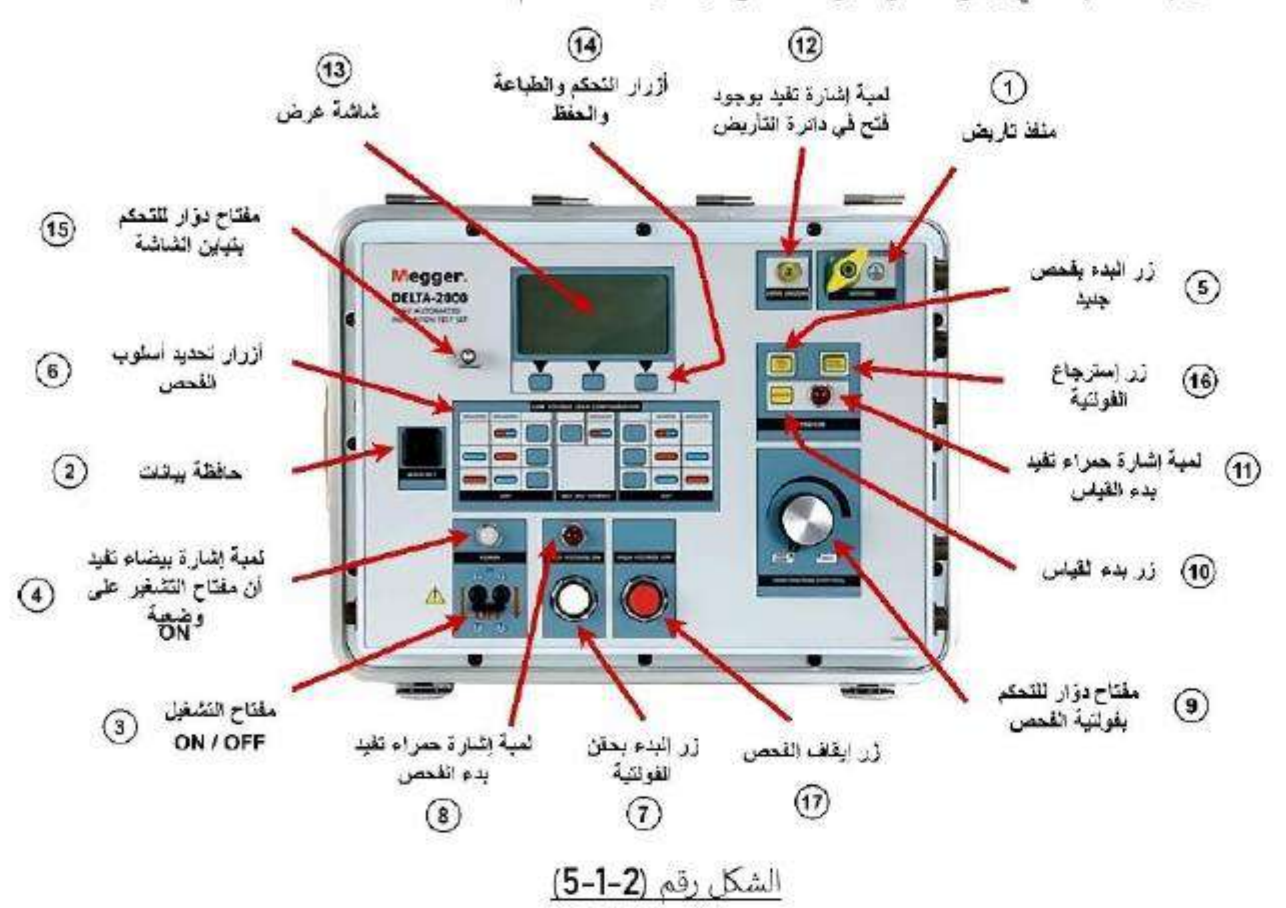
القيمة المُقاسة	النطاق (Range)	درجة الوضوح (Resolution)	الدقة (Accuracy)
الفولتية	250 V – 12 kV	10 V	±(1% of reading +1 digit)
التيار	0 – 5 A	1 µA	±(1% of reading +1 digit)
المواسعة	1 pF – 1.1 µF	0.01 pF	±(0.5% of reading + 2 pF) UST ±(0.5% of reading + 6 pF) GST
معامل التبديد	0 – 200%	0.01%	±(2% of reading + 0.05% DF)
معامل القدرة	0 – 90%	0.01%	±(2% of reading + 0.05% PF)
خسائر القدرة	0 – 2 kW	0.1 mW	±(2% of reading +1 mW)

- البيئة التشغيلية المحيطة : 32° F to 122° F (0° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing
- البيئة التخزينية المحيطة : -58° F to 140° F (-50° C to 50° C) RH to 95%, Non condensing
- أبعاد وحدة التحكم : 381 x 559 x 406 mm
- أبعاد وحدة الفولتية المرتفعة: 381 x 559 x 406 mm
- وزن وحدة التحكم : 74 lb. (33 kg)
- وزن وحدة الفولتية المرتفعة : 63 lb. (29 kg)

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

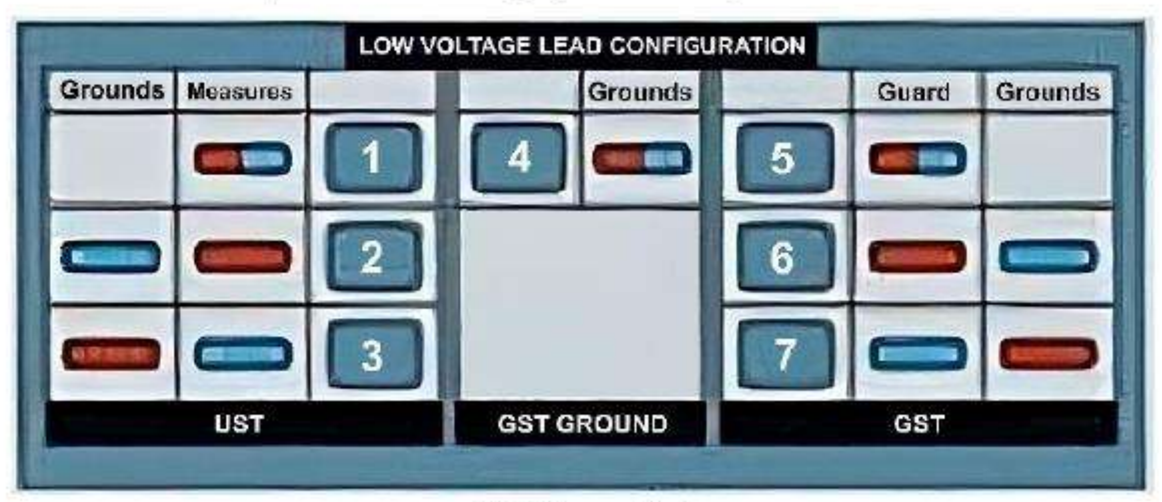
1. التأكد من تطبيق الخطوات (**6.1** إلى **6.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص معامل التبديد/القدرة والمواسعة.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها تماماً من الشحنات المخزنة.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير مُتسخة ولا تُعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**)، مع مراعاة عدم إستخدام الجهاز في الأجواء القابلة للإنفجار وكذلك الأجواء الماطرة وفي حال تساقط الثلوج أيضاً.
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كالآتي:

الشكل (**5-1-2**) التالي يُبين الأجزاء الرئيسية لواجهة وحدة التحكم.



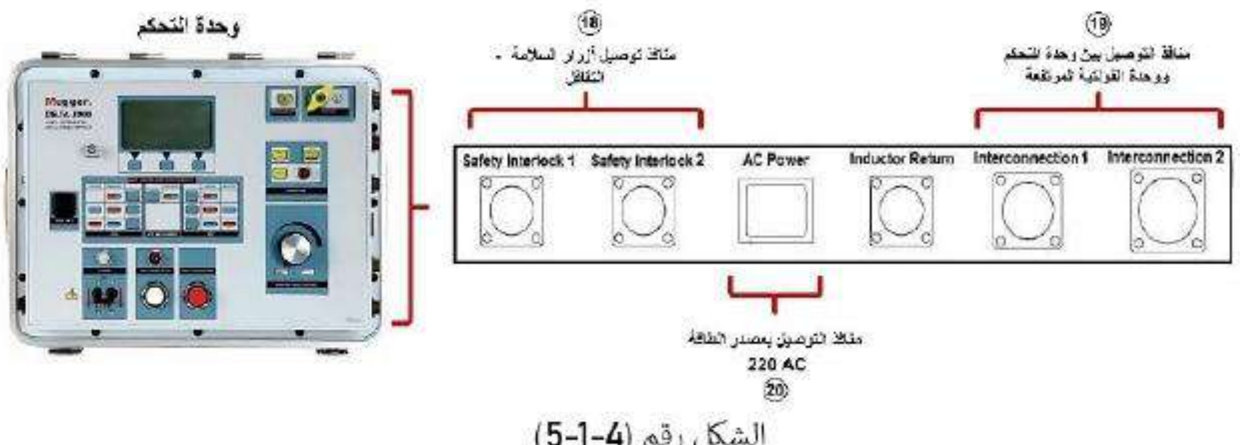
الشكل رقم (**5-1-2**)

الشكل (**5-1-3**) يُبين أزرار تحديد أسلوب الفحص الموجودة على وحدة التحكم.



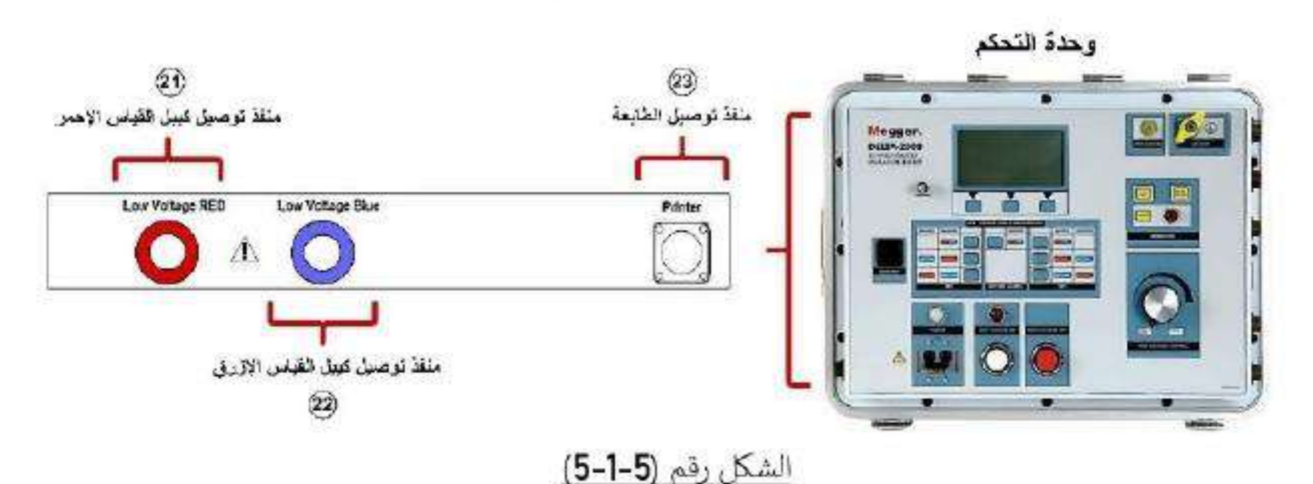
الشكل رقم (**5-1-3**)

الشكل (5-1-4) يُبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة التحكم.



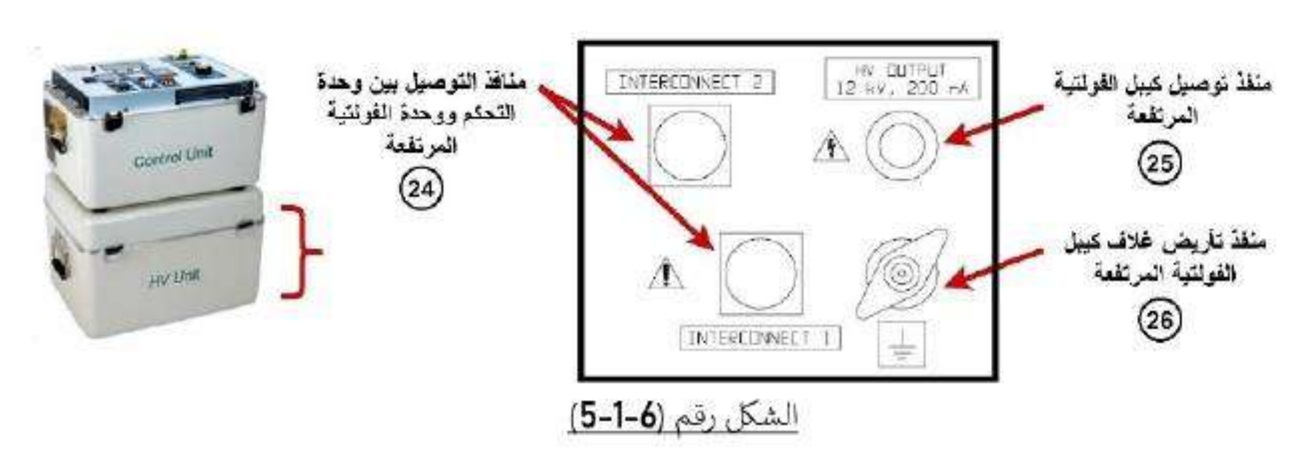
الشكل رقم (5-1-4)

الشكل (5-1-5) يُبين المنافذ الموجودة على يسار وحدة التحكم.



الشكل رقم (5-1-5)

الشكل (5-1-6) يبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة الفولتية المرتفعة.



الشكل رقم (5-1-6)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مُراعاة الأمور التالية:

7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.

7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.

7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مُغلقة.

7.4 مراعاة أن يكون سطح الفحص مستوي قدر الإمكان.

7.5 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.

7.6 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تُفيد بوجود فحص ذو فولتية خَطِرَة.

8. إحضار جهاز الفحص (**DELTA2000**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز على مسافة لا تقلّ عن (**1.8 m**) عن المحول بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**50°**) درجة مئوية، وكذلك مُراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.

9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (**3**) في الشكل (**5-1-2**) على وضعية (**OFF - O**) الموضحة على المفتاح.

10. وصل وحدة التحكم بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض رقم (**1**) في الشكل (**5-1-2**) بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنِّعة (**4.5m**) متر، مع مُراعاة أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله قبل الفحص وآخِر كيبل يتم إزالته عن الجهاز بعد الفحص.

11. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو مُعاوقة قليلة (**Low Impedance**)، مع مراعاة تأريض جهاز الفحص وخزان المحول من نفس نقطة التأريض.

12. توصيل كوابل الفحص وملحقات جهاز الفحص عبر المنافذ الخاصة بها كالآتي، مع مراعاة التأكد من أنها مُحكمَة التركيب على جهاز الفحص وأنها مقفلة (**Locked**):

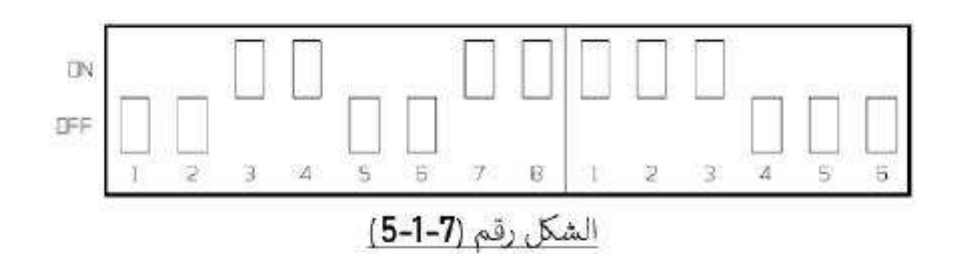
12.1 توصيل كابلين (**2 cables x 1.52m**) على المنافذ رقم (**19**) المُبينة في الشكل (**5-1-4**) يمين وحدة التحكم والمنافذ رقم (**24**) يمين وحدة الفولتية المرتفعة المُبينة في الشكل (**5-2-6**) تبعاً للتسمية على الجهاز (**Interconnection 1 & 2**)، وذلك للربط بين وحدة التحكم ووحدة الفولتية المرتفعة.

12.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأحمر (كيبل القياس) على المنفذ رقم (**21**) على وحدة التحكم المبين في الشكل (**5-1-5**) على يسار وحدة التحكم.

12.3 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأزرق (كيبل القياس) في حال أردنا إستخدامه على المنفذ رقم (**22**) المبين في الشكل (**5-1-5**) على يسار وحدة التحكم.

12.4 توصيل أسلاك أزرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التقافل (**Interlock**) على المنافذ رقم (**18**) المُبينة في الشكل (**5-1-4**) يمين وحدة التحكم.

12.5 توصيل الطابعة بجهاز الفحص عبر المنفذ رقم (**23**) المُبين في الشكل (**5-1-5**) يسار وحدة التحكم، مع مراعاة وضعية مفاتيح التبديل الثنائي (**Dip switch**) كما هو موضح بالشكل (**5-1-7**).



الشكل رقم (5-1-7)

12.6 توصيل كيبل الفولتية المرتفعة (الأسود) بالمنفذ رقم (**25**) المبين في الشكل (**5-1-6**) يمين وحدة الفولتية المرتفعة، مع مراعاة توصيل الغلاف الخارجي لهذا الكيبل (**Sheath**) مع الأرض عبر المنفذ رقم (**26**) المُبين في الشكل (**5-1-6**) يمين وحدة الفولتية المرتفعة.

13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمعاوقة قليلة (**Low Impedance**).

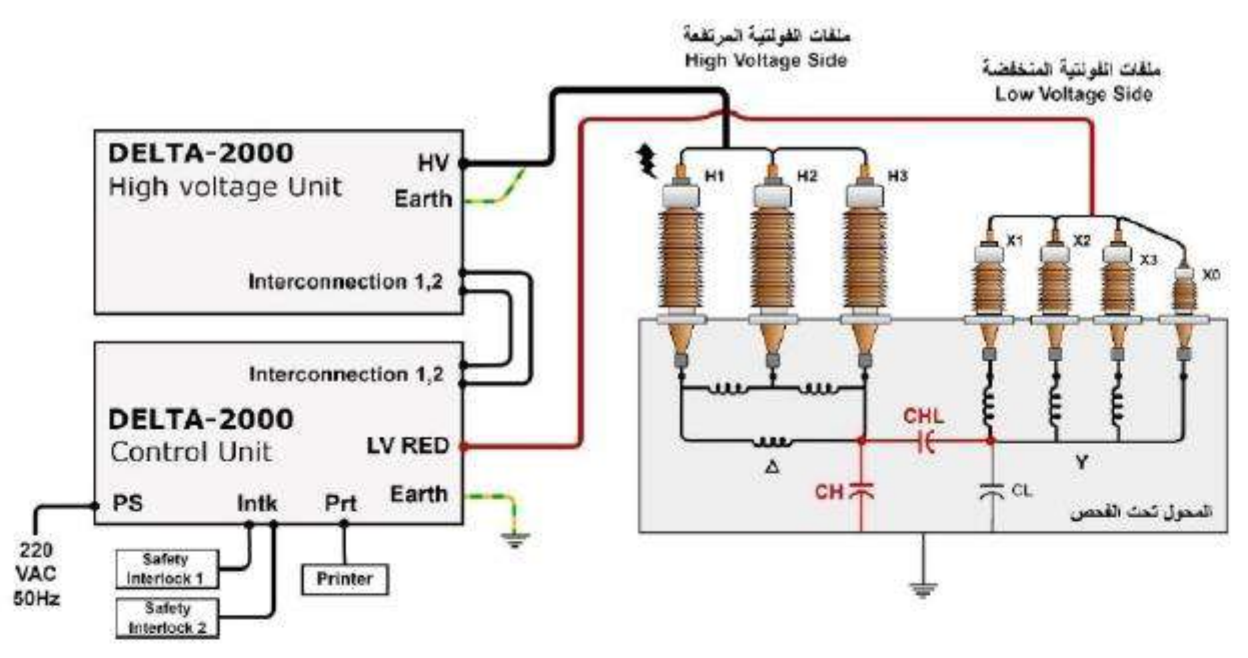
14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (**20**) في الشكل (**5-1-4**) بحيث يتم وصل كيبل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.

15. توصيل أسلاك الجهاز بالمحول على النحو التالي:

15.1 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three phase two winding**) فإنه يُمكن توصيل جهاز الفحص بالمحول بطريقتين:

- الطريقة الأولى

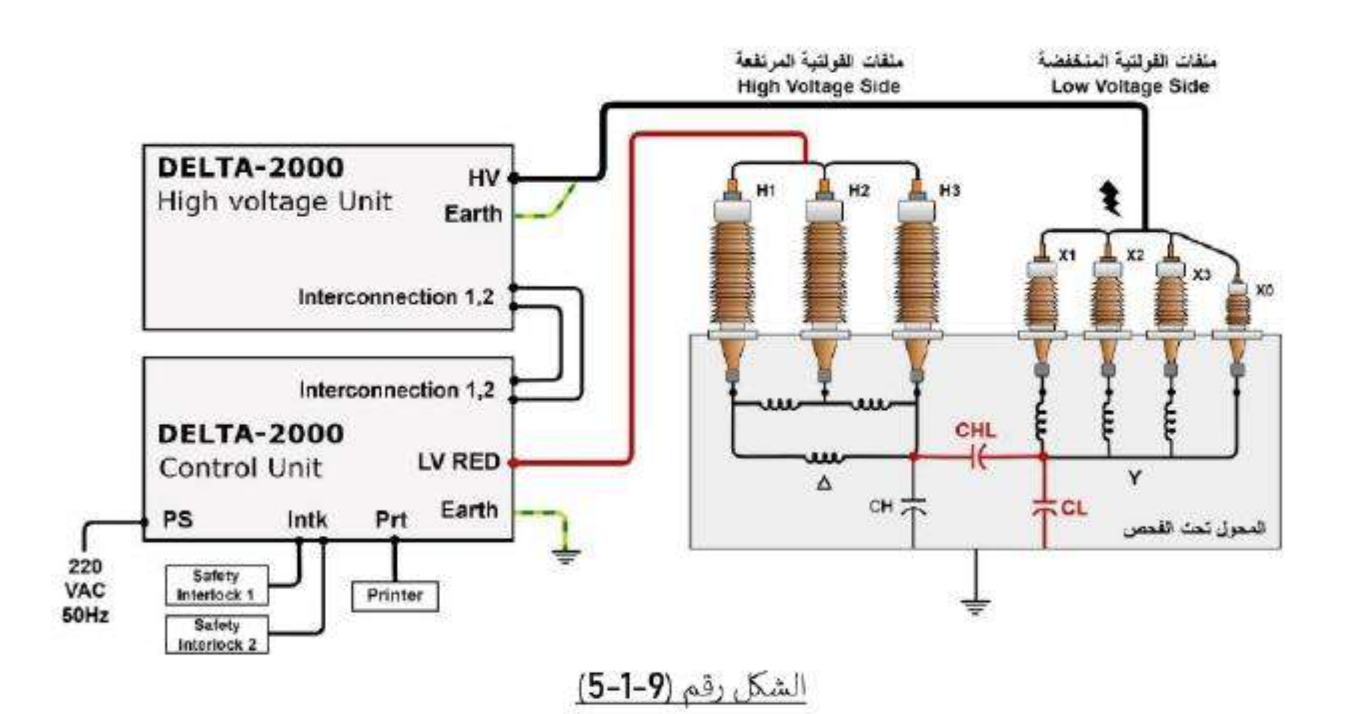
بواسطة هذه التوصيلة المُبينة في الشكل (**5-1-8**) يُمكن قياس مُركّبات العزل التالية (**CHL**) و (**CHL+CH**) و (**CH**).



الشكل رقم (5-1-8)

- **الطريقة الثانية**

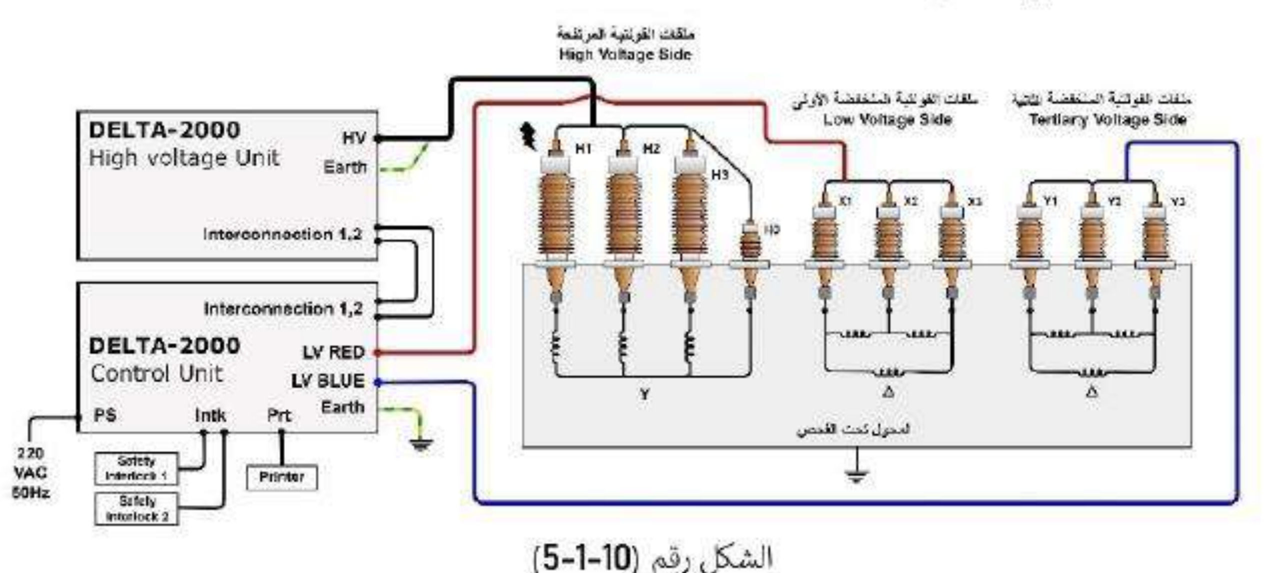
بواسطة هذه التوصيلة المُبينة في الشكل (**5-1-9**) يُمكن قياس مُركّبات العزل التالية (**CHL**) و (**CHL+CL**) و (**CL**).



الشكل رقم (**5-1-9**)

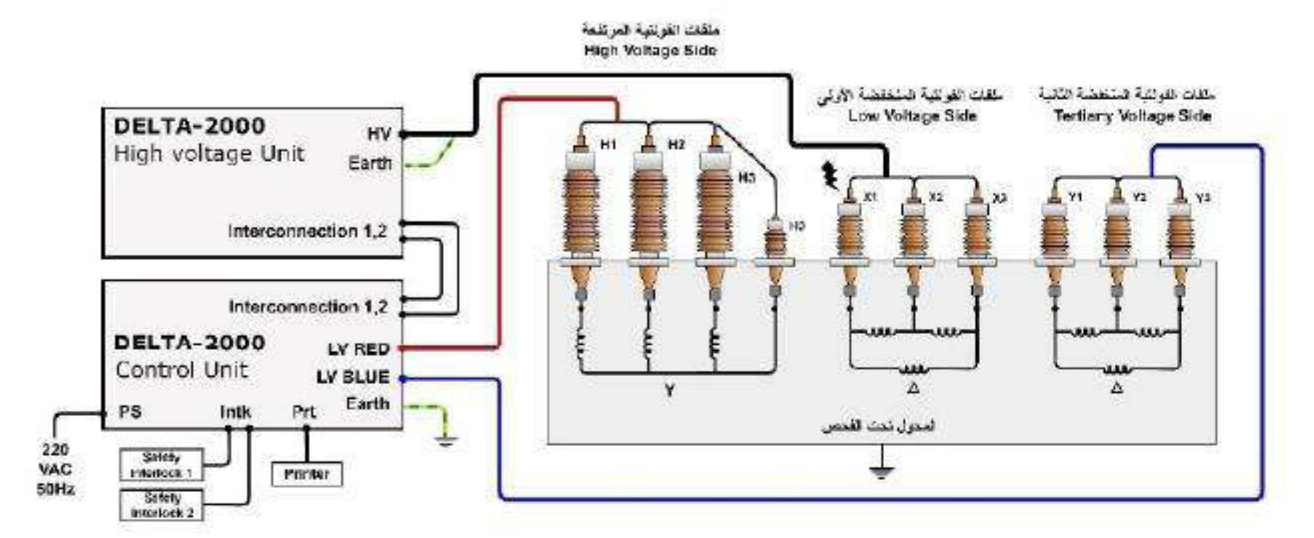
15.2 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (**Three phase tertiary winding**) فإنه يُمكن توصيل جهاز الفحص بالمحول بثلاث طُرق:

- **الطريقة الأولى**



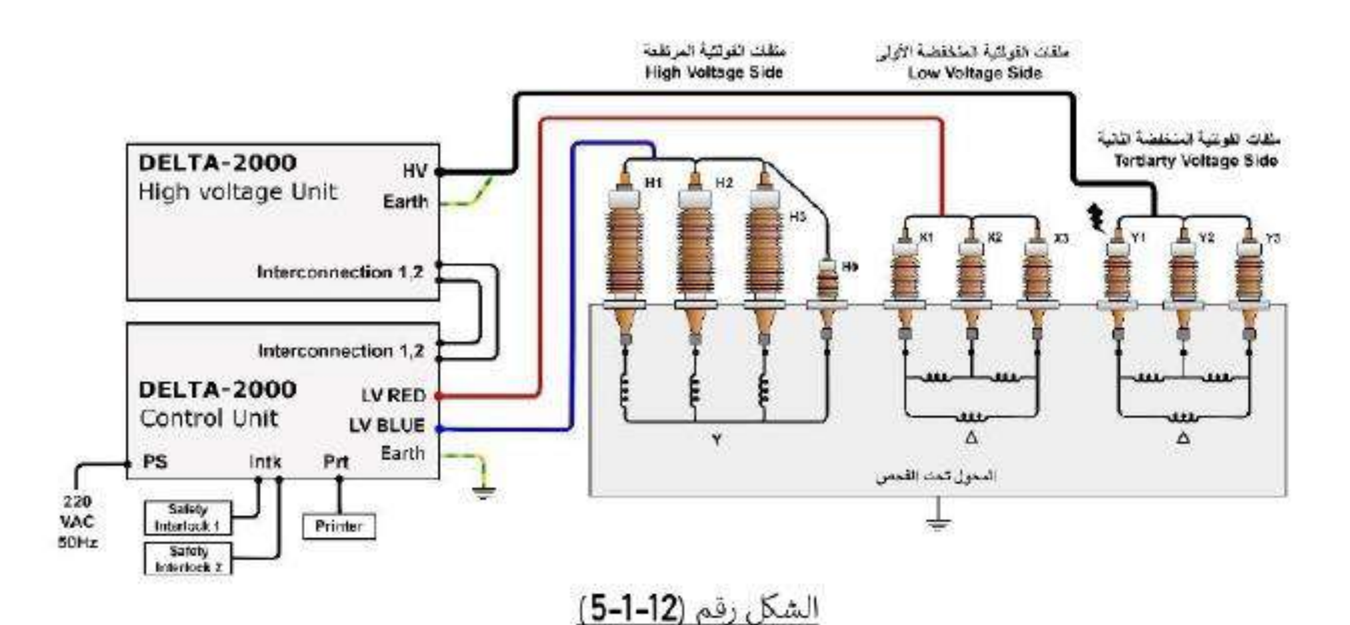
الشكل رقم (**5-1-10**)

- الطريقة الثانية



الشكل رقم (5-1-11)

- الطريقة الثالثة

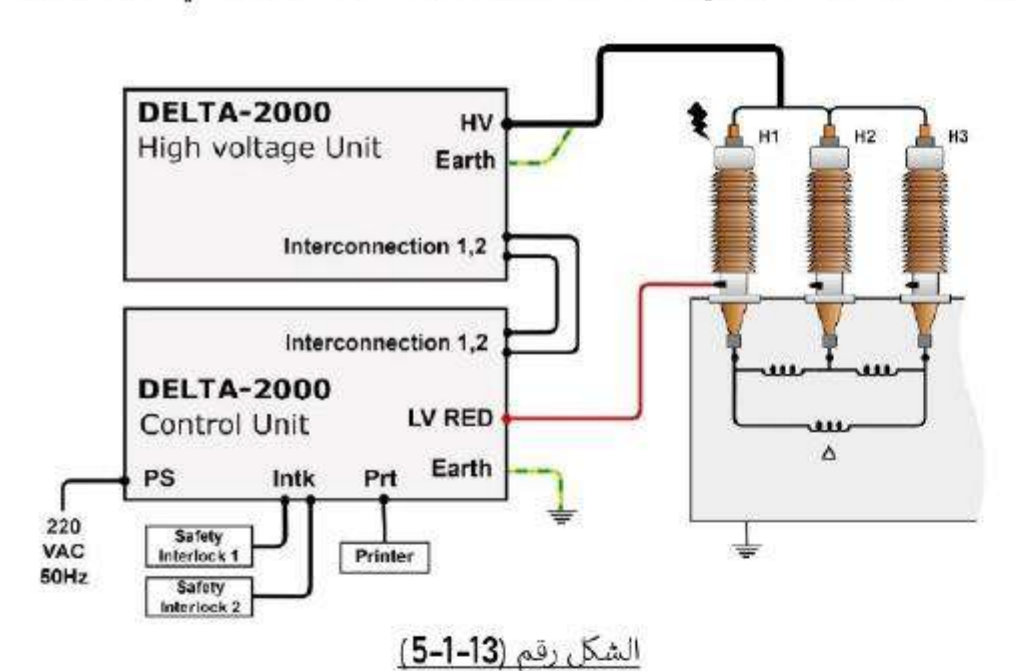


الشكل رقم (5-1-12)

15.3 لفحص عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (**HV bushings**) يتم عمل واحدة من التوصيلات التالية:

- **الطريقة الأولى**

بواسطة التوصيلة المُبينة في الشكل (**5-1-13**) يُمكن فحص العزل الرئيسي لعازل الإختراق (**C1**).

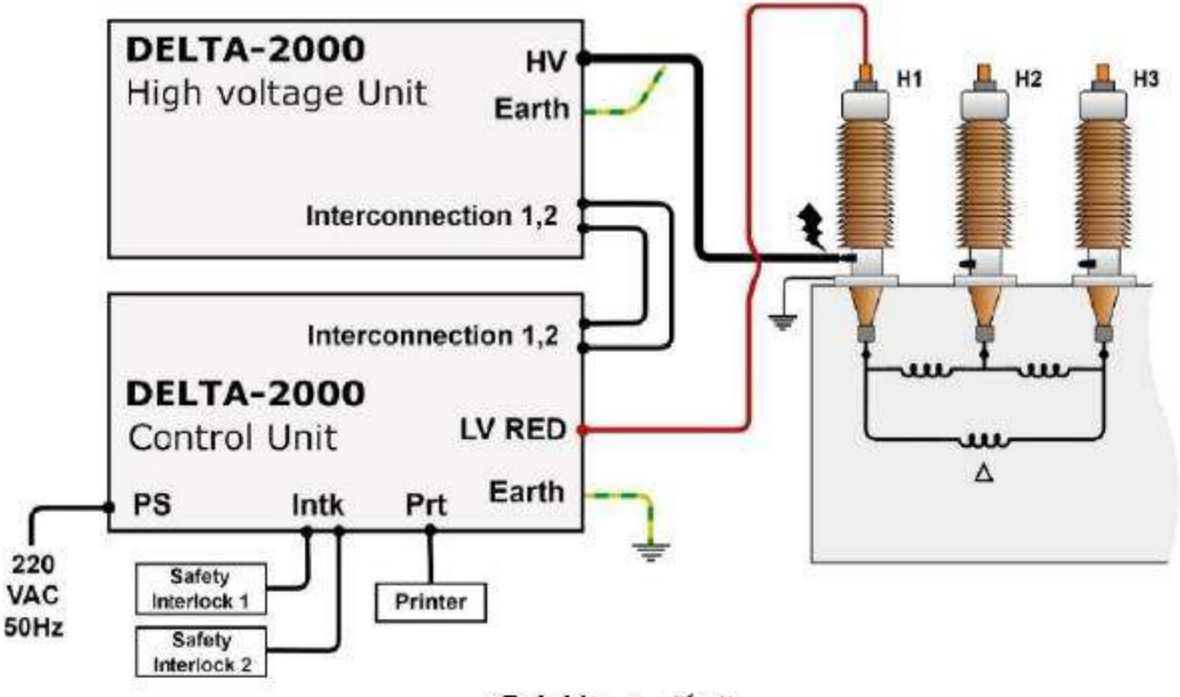


الشكل رقم (**5-1-13**)

في التوصيلة السابقة يتم مراعاة تأريض ملفات الفولتية المنخفضة المقصورة.

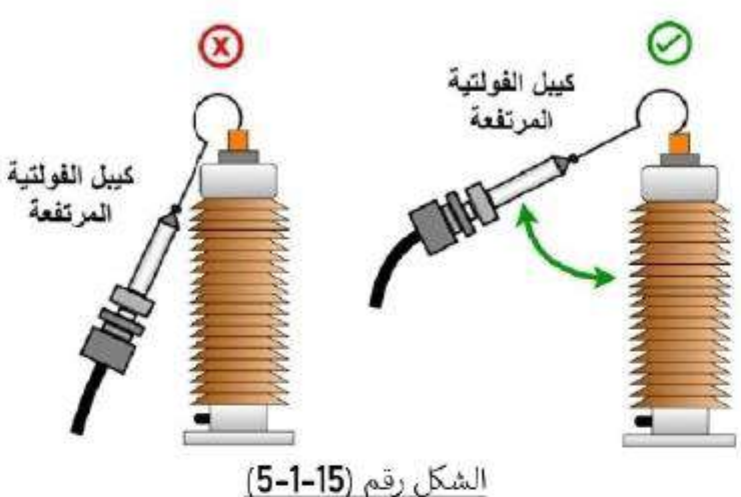
- **الطريقة الثانية**

بواسطة التوصيلة المبينة في الشكل (**5-1-14**) يُمكن فحص عزل مأخذ الفحص (**C2**).



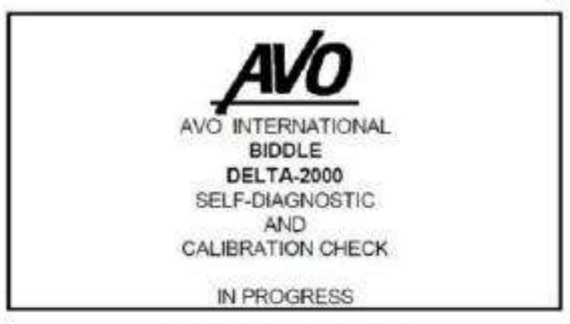
الشكل رقم (**5-1-14**)

الشكل (**5-1-15**) يوضح وضعية كيبل الفولتية المرتفعة الصحيحة والخاطئة عند وصله بعوازل إختراق المحول.



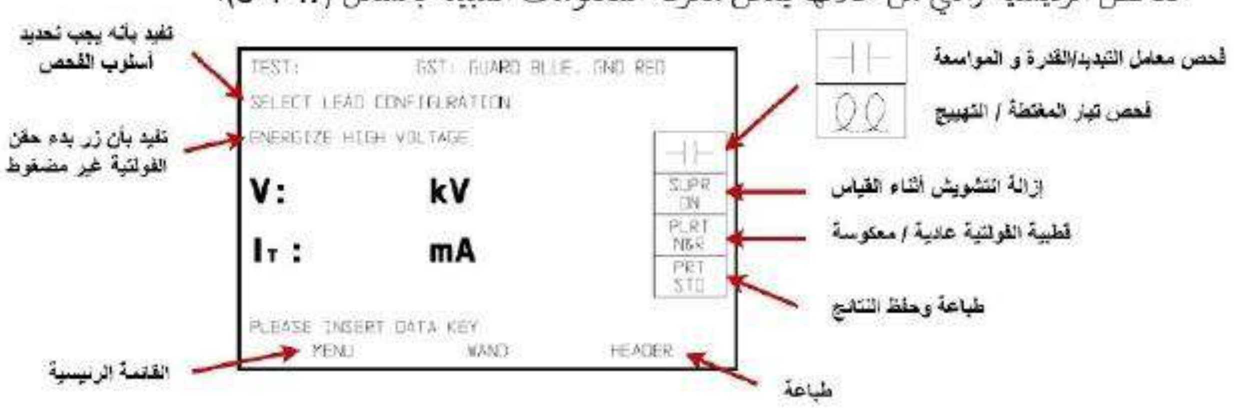
الشكل رقم (**5-1-15**)

16. بعد عمل توصيلة الفحص المناسبة نقوم بتشغيل جهاز الفحص عن طريق تغيير وضعية (رفع) مفتاح التشغيل رقم (**3**) المُبين في الشكل (**5-1-2**) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة بيضاء اللون رقم (**4**) المُبينة في ذات الشكل. لتظهر لنا الشاشة الإفتتاحية ويبدء إختبار التشخيصي الذاتي للجهاز كما هو مُبين بالشكل (**5-1-15**).



الشكل رقم (**5-1-16**)

17. بعد نجاح الإختبار التشخيصي الذاتي للجهاز وعدم إيجاد أية أخطاء يقوم الجهاز بالإنتقال لشاشة الفحص الرئيسية والتي من خلالها يُمكن معرفة المعلومات المُبينة بالشكل (**5-1-17**).



الشكل رقم (**5-1-17**)

يُمكن ضبط تباين الشاشة (**Contrast**) بواسطة المفتاح الدوّار رقم (**15**) المُبين في الشكل (**5-1-2**).

18. من شاشة الفحص السابقة يُمكن ملاحظة المربعات على يمين الشاشة والتي تُشير لبعض إعدادات الجهاز بشكل مختصر فيما إذا كانت مناسبة أو لا، وفي حال أردنا ضبط إعدادت الجهاز والفحص نقوم بإختيار القائمة الرئيسية (**MENU**) المُبينة في الشكل (**5-1-17**) وذلك بالضغط على الزر أسفلها، لننتقل للشاشة المبينة في الشكل (**5-1-18**) والتي من خلالها يُمكن ضبط إعدادات الفحص والجهاز كالآتي بإستخدام الأزرار الثلاثة أسفل شاشة العرض:

18.1 تحديد نوع القياسات (**Measurement**) فيما إذا كان فحص العازل (**AC Insulation test**) وهو ما يجب إختياره هنا، أو إختيار فحص تيار المغنطة / التهييج (**XFMR Excitation current test**) وهو فحص آخر سيتم التطرُّق له في الفصل التالي.

18.2 تحديد قيمة فولتية التصحيح (**Correction**) بإختيار (**10kV**) أو (**2.5kV**) كيلوفولت أو إلغاء التصحيح (**None**).

18.3 تحديد نوع نتيجة الفحص المعروضة على الشاشة (**Loss Display**)، بحيث يُمكن إختيار أن تكون النتيجة كمُعامل تبديد (**Dissipation Factor - DF**) أو معامل قدرة (**Power Factor-PF**).

18.4 تشغيل أو إيقاف إزالة التشويش (**Interference Suppressor**) وذلك بإختيار تشغيل (**ON**) إذا كانت منطقة الفحص عُرضة للتشويش كفحص المحولات في محطات التحويل المُكهربة (**Energized**) مرتفعة الفولتية.

18.5 تحديد قُطبية فولتية الفحص المُطبقة (**HV Polarity**) فيما إذا كانت عادية (**Normal**) أو عادية ومعكوسة (**Normal/Reverse**) وذلك للتخلُّص من تأثير تيارات التشويش الكهروستاتيكية الناتجة عادةً من محطات التحويل المجاورة ذات الفولتية المنخفضة.

بالإضافة إلى مجموعة من الإعدادت الأخرى الخاصة بطباعة وحفظ النتائج وضبط الوقت ومعايرة الجهاز وغيرها من الإعدادات.

EXIT TO TEST	11/26/96	10:27
MEASUREMENT:	AC INSULATION TEST (or) XFMR EXCITATION TEST	
CORRECTION:	NONE (or) 10 kV (or) 2.5 kV	
LOSS DISPLAY: POWER FACTOR (or) DISSIPATION FACTOR		
INTERFERENCE SUPPRESSOR:	ON (or) OFF	
HV POLARITY: NORMAL/REVERSE (or) NORMAL ONLY		
NEXT MENU		
ENTER (OR) CHANGE	UP	DOWN

الشكل رقم (**5-1-18**)

19. بعد الإنتهاء من ضبط إعدادات الفحص والجهاز نقوم بإختيار (**EXIT TO TEST**) من الشكل (**5-1-18**) وذلك للرجوع لشاشة الفحص الرئيسية المُبينة في الشكل (**5-1-17**). ومن ثم نقوم بالضغط على زر فحص جديد (**New test**) رقم (**5**) المُبين في الشكل (**5-1-2**).

20. إختيار أسلوب الفحص وفقاً لنوع المُعدّة فيما إذا كان محول أو عازل إختراق (**Bushing**) ونوع مُركّبة العزل المُراد فحصها كالآتي:

20.1 محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (Three phase two windings)

يتم إختيار أسلوب الفحص بالإعتماد على طبيعة القيمة المُراد قياسها وفقاً للجدول (**5-1-2**) التالي:

الجدول رقم (**5-1-2**)

توصيلة الجهاز بالمحول	مركبة العزل المراد فحصه	أسلوب الفحص	Measure	Ground	Guard	رقم زر أسلوب الفحص بالرجوع للشكل (5-1-3)
الطريقة الأولى الشكل (**5-1-8**)	CH + CHL	GST - Ground	-	RED	-	4
	CH	GST – Guard	-	-	RED	5
	CHL	UST	RED	-	-	2
الطريقة الثانية الشكل (**5-1-9**)	CL + CHL	GST - Ground	-	RED	-	4
	CL	GST – Guard	-	-	RED	5

20.2 محول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (Three phase tertiary winding)

يتم إختيار أسلوب الفحص بالإعتماد على طبيعة القيمة المُراد قياسها وفقاً للجدول (**5-1-3**) التالي:

الجدول رقم (**5-1-3**)

توصيلة الجهاز بالمحول	مركبة العزل المراد فحصه	أسلوب الفحص	Measure	Ground	Guard	رقم زر أسلوب الفحص بالرجوع للشكل (5-1-3)
الطريقة الأولى الشكل (**5-1-10**)	CH + CHL	GST - Guard	-	RED	BLUE	7
	CH + CHT	GST - Guard	-	BLUE	RED	6
	CH	GST – Guard	-	-	RED BLUE	5
	CHL	UST	RED	BLUE	-	2
	CHT	UST	BLUE	RED	-	3
الطريقة الثانية الشكل (**5-1-11**)	CL + CHL	GST - Guard	-	BLUE	RED	6
	CL + CLT	GST - Guard	-	RED	BLUE	7
	CL	GST - Guard	-	-	RED BLUE	5
	CLT	UST	BLUE	RED	-	3
الطريقة الثالثة الشكل (**5-1-12**)	CT + CHT	GST - Guard	-	BLUE	RED	6
	CT + CLT	GST - Guard	-	RED	BLUE	7
	CT	UST	-	-	RED BLUE	1

20.3 عوازل إختراق الفولتية المرتفعة (High Voltage Bushings)

يتم إختيار أسلوب الفحص بالإعتماد على طبيعة القيمة المُراد قياسها وفقاً للجدول (5-1-4) التالي:

الجدول رقم (5-1-4)

توصيلة الجهاز بعازل الإختراق	مركبة العزل المراد فحصه	أسلوب الفحص	Measure	Ground	Guard	رقم زر أسلوب الفحص حسب الشكل (5-1-3)
الطريقة الأولى الشكل (5-1-13)	C1	UST	RED	-	-	2
الطريقة الثانية الشكل (5-1-14)	C2	GST - Guard	-	-	RED	5

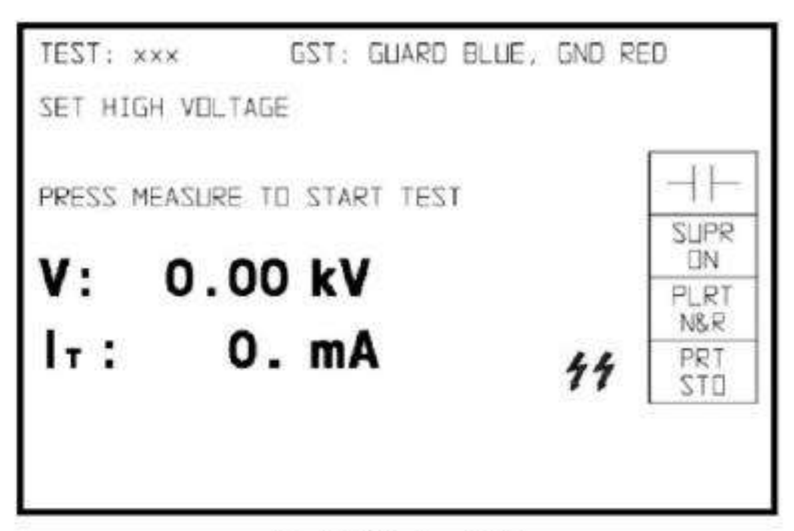
21. الضغط على أزرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التقافل (**Safety Interlock Push Buttons 1&2**) معاً و نبقيهما بهذه الحالة حتى إنتهاء الفحص كما هو مُبين بالشكل (**5-1-19**)، ويُنصح بأن يكون واحد من هذه الأزرار مع مشغل الجهاز والزر الثاني مع شخص آخر لزيادة السلامة في الحالات الطارئة. حيث أنه في حالات الطوارئ أثناء الفحص نوقف الضغط على هذ الأزرار لإيقاف حقن الفولتية أو نقوم بالضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (**17**) المبين في الشكل (**5-1-2**).



الشكل رقم (5-1-19)

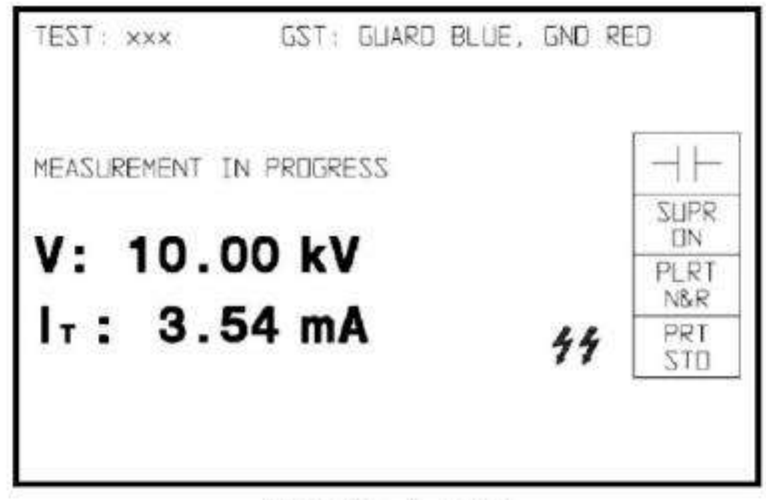
22. تصفير المفتاح الدوّار (**9**) المُبين في الشكل (**5-1-2**) أي جعله على وضعية (**ZERO START**).

23. الضغط على زر البدء بحقن الفولتية الأبيض (**7**) المُبين في الشكل (**5-1-2**)، وملاحظة إنارة لمبة الإشارة الحمراء (**8**) المبينة في الشكل (**5-1-2**) والتي تفيد بدء حقن الفولتية، وكذلك ظهور إشارتي البرق على شاشة العرض والتي أيضاً تُفيد بدء حقن الفولتية كما هو مُبين في الشكل (**5-1-20**).



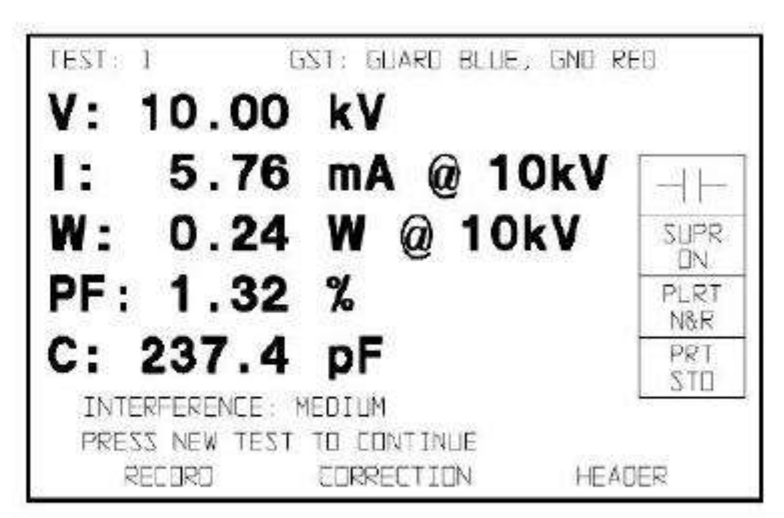
الشكل رقم (5-1-20)

24. البدء بتحريك المفتاح الدوّار (**9**) لرفع الفولتية وتثبيتها عند الفولتية المُراد فحص المُعدّة عندها وفي حالتنا هذه سنختار (**10kV**) كيلوفولت. (يُمكن الإعتماد على فقرة تحديد الفولتية المُضمّنة في خطوات وأساليب الفحص (**6**) من هذا الفصل)
25. نقوم بالضغط على زر القياس (**MEASURE**) رقم (**10**) المُبين في الشكل (**5-1-2**) لتظهر لنا الشاشة المُبينة في الشكل (**5-1-21**) وكذلك إنارة لمبة الإشارة الحمراء (**11**) المُبينة في الشكل (**5-1-2**)، والتي تُفيد بدء القياس حيث تنطفأ هذه اللمبة عند إنتهاء القياس ولكنها لا تعني عدم وجود فولتية.



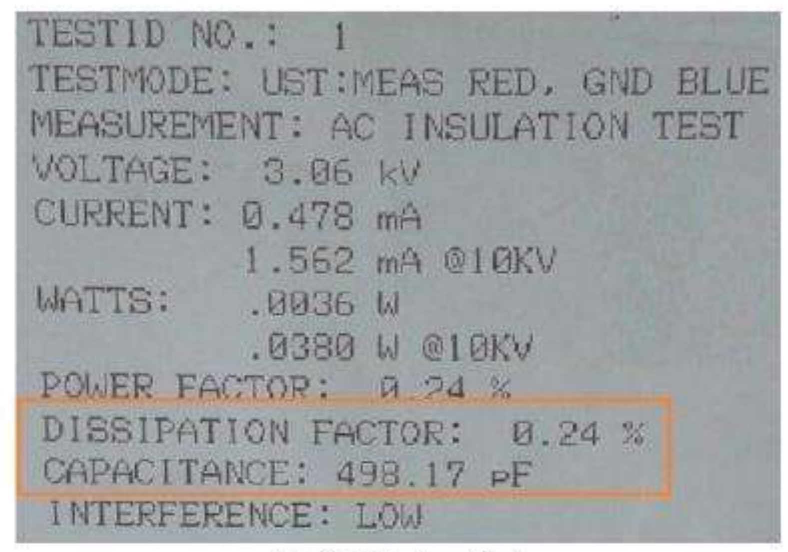
الشكل رقم (5-1-21)

26. بعد الإنتهاء من القياس تظهر نتيجة الفحص على الشاشة المُبينة في الشكل (**5-1-22**) حيث يُمكن الآن إيقاف الضغط على أزرار السلامة (**Interlock pushbuttons 1&2**).



الشكل رقم (5-1-22)

27. يُمكن طباعة النتيجة عبر الضغط على الزر أسفل كلمة (**Header**) الظاهرة على شاشة العرض لطباعة النتيجة وحفظها، ويبين الشكل (**5-1-23**) نتيجة فحص سابق (مطبوعة) تم إجراؤوه لعازل إختراق محول من النوع (**OIP Bushing 400kV**) عند فولتية فحص (**3kV**) كيلوفولت وأيضاً تظهر نتيجة الفحص مُصححة لـ(**10kV**) كيلوفولت.



الشكل رقم (5-1-23)

28. بعد ذلك يُمكن الضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (**17**) المُبين في الشكل (**5-1-2**)، وكذلك تغيير وضعية المفتاح الدوّار (**9**) إلى الصفر في حال أردنا إنهاء الفحص، ولكن إذا أردنا إجراء فحص آخَر يمكن الضغط على زر فحص جديد (**5**) المُبين في الشكل (**5-1-2**) و إعادة الخطوات من الخطوة (**19**) إلى آخِر الخطوات.

الملحق (2-5)

إختيار فولتية الفحص المناسبة

في هذا الباب وردت الكثير من المقترحات والتي سيتم ذكرها وفقاً للمرجع المُضمّنة فيه:

- ✓ **معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE)**

وفقاً للمِعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Std C57.12.90-2015]**، فإن فولتية الفحص يجب ألا تزيد عن فولتية التحمُّل (**Withstand voltage**) للملفات أو نصف قيمة فولتية الفحص منخفضة التردد الواردة بالجداول رقم (**3** و**4**) بالمعيار **[IEEE Std C57.12.00-2015]** والمرفقة في الملحق رقم (**3-5**) أو ألا تزيد عن (**10kV**) أيُهما أقل.

- ✓ **اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC)**

وفقاً للمِعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60137-2017]**، فإن الفولتية المقترحة لإجراء هذا الفحص لعوازل إختراق المحولات (**Bushings**) العاملة بالموقع بشكل عام، يجب أن يكون محصور بين (**2kV**) كيلوفولت و(**20kV**) كيلوفولت.

- ✓ **النشرة التقنية الصادرة عن شركة (ABB)**

عند إجراء هذا الفحص على عوازل الإختراق (**Bushings**) بتطبيق الفولتية على الموصل الوسطي أي عند فحص العزل الرئيسي لعازل الإختراق (**C1**) بالأسلوب الموضح في الشكل [(**5-19**) (أ)] فإن الفولتية الموصى بها هي (**10kV**) كيلوفولت، أما في حال تطبيق هذا الفحص على عوازل الإختراق (**Bushings**) بالأسلوب الموضح في الشكل [(**5-19**) (ب)] أي بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (**Test Tap**)، فإن أقصى فولتية هي (**500V**) فولت في حال كان مأخذ الفحص (**Test Tap**) مفحوص مصنعياً عند (**2kV**) كيلوفولت، وفي حال كان مأخذ الفحص (**Test Tap**) مفحوص مصنعياً عند (**20kV**) كيلوفولت فإنه يُمكن تطبيق فولتية فحص قد تصل لـ(**5kV**) كيلوفولت كما ورد بالنشرة التقنية الصادرة عن الشركة **[ABB, Bushing diagnostics and conditioning, 2750 515-142 en, Rev.1]**.

- ✓ **النشرة التقنية الصادرة عن (USBR)**

أوردت هذه النشرة **[USBR, Testing and Maintenance of High-Voltage Bushings Vol 3-2]** مجموعة من القِيَم المُقترحة لفولتية الفحص في حال تطبيق هذا الفحص على عوازل الإختراق (**Bushings**) بالأسلوب الموضح في الشكل [(**5-19**) (ب)]، أي بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (**Test Tap**) وفقاً لنوع عازل الإختراق والشركة المُصنّعة كالآتي:

الجدول رقم (5-2-1)

الشركة المُصنّعة	نوع عازل الإختراق أو تصنيفه	فولتية الفحص المُقترحة بالفولت
General Electric	LC, U	2000
Lapp	POC	2000
Ohio Brass	L	250
Ohio Brass	GK, LK	500
Pennsylvania	P	500
Westinghouse	S, OS	500

✓ المرجع **(Paul Gill, Electric Power Equipment Maintenance and Testing)**

أورد هذا المرجع مجموعة من القِيَم المُقترحة لفولتية الفحص في حال تطبيق هذا الفحص على عوازل الإختراق (**Bushings**) بالأسلوب الموضح في الشكل [(**5-19**) (ب)]، أي بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (**Test Tap**) وفقاً لمستوى فولتية عازل الإختراق (**Bushing**) كالآتي:

الجدول رقم (5-2-2)

فولتية عازل الإختراق بالكيلوفولت (**Bushing**)	فولتية الفحص المُقترحة بالفولت
أقل من **69**	500
أكثر من **115**	5000

✓ **الكُتيّب التفصيلي الخاص بخطوات الفحص الصادر عن شركة (Doble)**

وفقاً لما ورد في الكُتيّب التفصيلي [**Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A**] الصادر عن شركة (**Doble**) عند إجراء هذا الفحص للمحولات المغمورة بالزيت فإن مستوى فولتية الفحص المُقترحة كالآتي:

الجدول رقم (5-2-3)

الفولتية الإسمية لملفات المحول بالكيلوفولت (Lint to Line KV)	فولتية الفحص المُقترحة بالكيلوفولت (Line to Ground kV)
أكثر من أو يساوي **12**	10
5.04 - 8.72	5
2.4 - 4.8	2
أقل من **2.4**	1

عند إجراء هذا الفحص على عوازل الإختراق (**Bushings**) بتطبيق الفولتية على الموصل الوسطي، أي عند فحص العزل الرئيسي لعازل الإختراق (**C1**) بالأسلوب الموضح في الشكل [(**5-19**) (أ)]، فإن مستوى فولتية الفحص المُقترحة كالآتي:

الجدول رقم (**5-2-4**)

فولتية عازل الإختراق بالكيلوفولت (**Bushing insulation class**)	فولتية الفحص المُقترحة بالكيلوفولت
أكثر من **8.7**	**10**
8.7	**5**
5	**5**
4.3	**2**
1.2	**1**

عند إجراء هذا الفحص على عوازل الإختراق (**Bushings**) بتطبيق الفولتية على مأخذ الفحص (**Test Tap**) بالأسلوب الموضح في الشكل [(**5-19**) (ب)]، فإن مستوى فولتية الفحص المُقترحة كالآتي:

الجدول رقم (**5-2-5**)

فولتية عازل الإختراق بالكيلوفولت	فولتية الفحص المُقترحة بالفولت
أكثر من **69** (**Voltage Tap**)	**2000** وكحد أقصى **5000**
أقل من أو يساوي **69** (**Power Factor Tap**)	**500**

الملحق (3-5)

فولتية التحمُّل للفحوصات مُنخفضة التردد كما وردت بالمِعيار [IEEE Std C57.12.00-2015] الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE) لمحولات القدرة من التصنيف الأول والثاني (Class (I & II

Table 3—Dielectric insulation levels for distribution and Class I power transformers, voltages in kV

Maximum system voltage (kV rms)	Nominal system voltage[a, g] (kV rms)	Applied voltage test[f] (kV rms)			Induced voltage test[b, f] (phase to ground) (kV rms)	Winding line-end BIL[c, f] (kV crest)			Neutral BIL[d, e, h] (kV crest)	
		Delta or fully insulated wye	Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL		Minimum	Alternates		Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL
Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11
Distribution transformers										
1.5	1.2[e]	10	—	10	1.4	**30**			30	30
3.5	2.5[e]	15	—	15	2.9	**45**			45	45
6.9	5[e]	19	—	19	5.8	**60**			60	60
11	8.7[e]	26	—	26	10	**75**			75	75
17	15	34	—	34	17	**95**	110		75	75
26	25	40	—	40	29	**125**	**150**		75	95
36	34.5	50	—	50	40	125	**150**	**200**	75	125
48	46	95	—	70	53	200	**250**		95	150
73	69	140	—	95	80	250	**350**		95	200
Class I power transformers										
1.5	1.2	10	10	10	1.4	**30**	**45**		45	45
3.5	2.5	15	15	15	2.9	**45**	**60**		60	60
6.9	5	19	19	19	5.8	**60**	**75**		75	75
11	8.7	26	26	26	10	**75**	**95**		95	95
17	15	34	26	34	17	**95**	**110**		95	110
26	25	50	26	40	29	**150**			95	125
36	34.5	70	26	50	40	**200**			95	150
48	46	95	34	70	53	200	**250**		110	200
73	69	140	34	95	80	250	**350**		110	250

[a] For nominal system voltage greater than maximum system voltage, use the next higher voltage class for applied voltage test levels.

[b] Induced voltage tests shall be conducted at 2.0 × nominal system voltage for 7200 cycles.

[c] Bold typeface BILs are the most commonly used standard levels.

[d] Y-Y connected transformers using a common solidly grounded neutral may use neutral BIL selected in accordance with the low-voltage winding rating.

[e] Single-phase distribution and power transformers and regulating transformers for voltage ratings between terminals of 8.7 kV and below are designed for both Y and Δ connection, and are insulated for the test voltages corresponding to the Y connection so that a single line of transformers serves for the Y and Δ applications. The test voltages for such transformers, when connected and operated, are therefore higher than needed for their voltage rating.

[f] For series windings in transformers, such as regulating transformers, the test values to ground shall be determined by the BIL of the series windings rather than by the rated voltage between terminals.

[g] Values listed as nominal system voltage in some cases (particularly voltages 34.5 kV and below) are applicable to other lesser voltages of approximately the same value. For example, 15 kV encompasses nominal system voltages of 14 440 V, 13 800 V, 13 200 V, 13 090 V, 12 600 V, 12 470 V, 12 000 V, 11 950 V.

[h] Neutral BIL shall never exceed winding BIL.

Table 4—Dielectric insulation levels for all windings of Class II power transformers, voltages in kV

Maximum system voltage (kV rms)	Nominal system voltage[a] (kV rms)	Applied voltage test[g] (kV rms)			Induced voltage test[b,c] (phase to ground) (kV rms)		Winding line-end BIL[d] (kV crest)				Neutral BIL[e,g] (kV crest)	
		Delta and fully insulated wye	Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL	Enhanced 7200 cycle	One hour	Mini-mum	Alternates			Grounded wye	Impedance grounded wye or grounded wye with higher BIL
Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12	Col 13
<= 17	<= 15	34	34	34	16	14	**110**				110	110
26	25	50	34	40	26	23	**150**				110	125
36	34.5	70	34	50	36	32	**200**				110	150
48	46	95	34	70	48	42	200	**250**			110	200
73	69	140	34	95	72	63	250	**350**			110	250
121	115	173	34	95	120	105	350	**450**	550		110	250
145	138	207	34	95	145	125	450	**550**	650		110	250
169	161	242	34	140	170	145	550	**650**	750	825	110	350
242	230	345	34	140	240	210	650	**750**	**825**	**900**	110	350
362	345	518	34	140	360	315	900	1050	1175		110	350
550	500	N/A	34	140	550[f]	475[f]	1425	1550	1675		110	350
765	735	N/A	34	140	880[f]	750[f]	1950[f]	2050			110	350
800	765	N/A	34	140	885[f]	795[f]	1950[f]	2050			110	350

[a]For nominal system voltage greater than maximum system voltage, use the next higher voltage class for applied test levels.

[b]Induced voltage tests shall be conducted at 1.58 × nominal system voltage for one hour and 1.80 × nominal system voltage for enhanced 7200 cycle test.

[c]Column 6 and Column 7 provide phase-to-ground test levels that would normally be applicable to wye windings. When the test voltage level is to be measured phase-to-phase (as is normally the case with delta windings), the levels in Column 6 and Column 7 must be multiplied by 1.732 to obtain the required phase-to-phase induced-voltage test level.

[d]Bold typeface BILs are the most commonly used standard levels.

[e]Y-Y connected transformers using a common solidly grounded neutral may use neutral BIL selected in accordance with the low-voltage winding rating.

[f]For 500 kV to 765 kV nominal system voltages, induced voltage test levels do not follow rules in footnote b, and 1950 kV BIL is not a standard IEEE level.

[g]If user specifies a different BIL for the neutral than indicated above, the applied test voltage shall also be specified.

الملحق (4-5)

قيمة معامل التصحيح k وفقاً للكُتيّب التفصيلي الخاص بجهاز الفحص (**DELTA2000**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**)

<u>الجدول رقم (1-4-5)</u>

درجة الحرارة (C°)	معامل التصحيح	درجة الحرارة (C°)	معامل التصحيح
0	1.56	27	0.73
1	1.54	28	0.70
2	1.52	29	0.67
3	1.50	30	0.63
4	1.48	31	0.60
5	1.46	32	0.58
6	1.45	33	0.56
7	1.44	34	0.53
8	1.43	35	0.51
9	1.41	36	0.49
10	1.38	37	0.47
11	1.35	38	0.45
12	1.31	39	0.44
13	1.27	40	0.42
14	1.24	42	0.38
15	1.20	44	0.36
16	1.16	46	0.33
17	1.12	48	0.30
18	1.08	50	0.28
19	1.04	52	0.26
20	1	54	0.23
21	0.96	56	0.21
22	0.91	58	0.19
23	0.87	60	0.17
24	0.83	62	0.16
25	0.79	66	0.14
26	0.76	70	0.12

قيمة معامل التصحيح k وفقاً للكُتيّب التفصيلي الصادر عن شركة (**Doble**) والخاص بخطوات هذا الفحص **[Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A]**

المحولات

TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C

LIQUID-FILLED TRANSFORMERS, SHUNT REACTORS, AND VOLTAGE REGULATORS

POWER TRANSFORMERS (Above 500 kVA)				DISTRIBUTION TRANSFORMERS (500 kVA and Below)								PTs/VTs, CTs, and MOs		
	Oil-Filled Transformers				Oil-Filled			TEST TEMPERATURES					Oil-Filled	
Askarel-Filled Trans.	Free Breathing and Pre-1955 Conservator Types	Sealed, Gas-blanketed, and Modern Conservator Types	Silicone	Askarel	Prior to 1950	Modern	Silicone	°C	°F	HV/EHV Shunt Reactors (Oil-Filled)	Voltage Regulators (Oil-Filled)	Askarel	Modern, Rated 220 kV and Above	All Others
—	1.56	.95	—	—	1.56	1.57	—	0	32.0	.95	1.56	—	1.57	1.67
—	1.52	.96	—	—	1.52	1.50	—	2	35.6	.96	1.52	—	1.50	1.61
—	1.48	.98	—	—	1.48	1.44	—	4	39.2	.98	1.48	—	1.44	1.55
—	1.45	.98	—	—	1.45	1.37	—	6	42.8	.98	1.45	—	1.37	1.49
—	1.43	.99	—	—	1.43	1.31	—	8	46.4	.99	1.43	—	1.31	1.43
—	1.38	.99	—	—	1.38	1.25	—	10	50.0	.99	1.38	—	1.25	1.36
—	1.31	1.00	—	—	1.31	1.19	—	12	53.6	1.00	1.31	—	1.19	1.30
—	1.24	1.01	—	—	1.24	1.14	—	14	57.2	1.01	1.24	—	1.14	1.23
—	1.16	1.01	—	—	1.16	1.09	—	16	60.8	1.01	1.16	—	1.09	1.16
—	1.08	1.00	—	—	1.08	1.05	—	18	64.4	1.00	1.08	—	1.05	1.08
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
.90	.91	.99	.96	.90	.91	.96	.96	22	71.6	.99	.91	.90	.96	.93
.81	.83	.98	.92	.81	.83	.92	.92	24	75.2	.98	.83	.81	.92	.86
.72	.76	.97	.88	.72	.76	.88	.88	26	78.8	.97	.76	.72	.88	.80
.64	.70	.96	.84	.64	.70	.84	.84	28	82.4	.96	.70	.64	.84	.74
.56	.63	.95	.80	.56	.63	.80	.80	30	86.0	.95	.63	.56	.80	.69
.51	.58	.94	.76	.51	.58	.76	.76	32	89.6	.94	.58	.51	.76	.65
.46	.53	.93	.73	.46	.53	.73	.73	34	93.2	.93	.53	.46	.73	.60
.42	.49	.91	.70	.42	.49	.70	.70	36	96.8	.91	.49	.42	.70	.56
.39	.45	.90	.67	.39	.45	.67	.67	38	100.4	.90	.45	.39	.67	.52
.35	.42	.89	.65	.35	.42	.65	.65	40	104.0	.89	.42	.35	.65	.48
.33	.38	.87	.62	.33	.38	.62	.62	42	107.6	.87	.38	.33	.62	.45
.30	.36	.86	.59	.30	.36	.59	.59	44	111.2	.86	.36	.30	.59	.42
.28	.33	.84	.56	.28	.33	.56	.56	46	114.8	.84	.33	.28	.56	—
.26	.30	.83	.54	.26	.30	.54	.54	48	118.4	.83	.30	.26	.54	—
.24	.28	.81	.51	.24	.28	.51	.51	50	122.0	.81	.28	.24	.51	—
.22	.26	.79	.49	.22	.26	.49	.49	52	125.6	.79	.26	.22	.49	—
.21	.23	.77	.47	.21	.23	.47	.47	54	129.2	.77	.23	.21	.47	—
.19	.21	.75	.45	.19	.21	.45	.45	56	132.8	.75	.21	.19	.45	—
.18	.19	.72	.43	.18	.19	.43	.43	58	136.4	.72	.19	.18	.43	—
.16	.17	.70	.41	.16	.17	.41	.41	60	140.0	.70	.17	.16	.41	—

TMCF 2090 REV A

قيمة معامل التصحيح k وفقاً للكُتيّب التفصيلي الصادر عن شركة (**Doble**) والخاص بخطوات هذا الفحص **[Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A]**

عوازل الإختراق (1/2)



TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C

BUSHINGS

ABB		ASEA	BROWN BOVERI				GENERAL ELECTRIC						HAEFELY
Type T	Type O + C	All GO Types 25-765 kV	Types CTF, CTKF 20-60 kV	Types CTF, CTKF 85-330 kV	TEST TEMPERATURES °C	°F	Type B	Type F	Types L, LC, LI, LM	Types OF, OFI, OFM	Types S, SI, SIM (Cpd.-Filled)	Types TandU	Types COT, COS, SOT
1.02	.87	.79	1.24	1.00	0	32.0	1.09	.93	1.00	1.18	1.26	1.02	—
1.02	.89	.81	1.22	↑	2	35.6	1.09	.95	1.00	1.16	1.24	1.02	—
1.02	.91	.83	1.20		4	39.2	1.09	.97	1.00	1.15	1.21	1.02	—
1.01	.92	.85	1.17		6	42.8	1.08	.98	1.00	1.13	1.19	1.01	—
1.01	.93	.87	1.15		8	46.4	1.08	.99	1.00	1.11	1.16	1.01	—
1.01	.94	.89	1.12		10	50.0	1.07	.99	1.00	1.10	1.14	1.01	0.88
1.01	.95	.92	1.10		12	53.6	1.06	.99	1.00	1.08	1.11	1.01	0.90
1.01	.96	.94	1.08		14	57.2	1.05	1.00	1.00	1.06	1.08	1.01	0.93
1.00	.98	.95	1.05		16	60.8	1.04	1.00	1.00	1.04	1.06	1.00	0.95
1.00	.99	.98	1.03		18	64.4	1.02	1.00	1.00	1.02	1.03	1.00	0.98
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.01	1.03	.98		22	71.6	.97	.99	.99	.97	.97	1.00	1.02
1.00	1.02	1.05	.96		24	75.2	.93	.97	.99	.94	.93	1.00	1.04
.99	1.03	1.07	.94		26	78.8	.90	.96	.98	.91	.90	.99	1.07
.99	1.04	1.09	.91		28	82.4	.85	.94	.97	.88	.87	.99	1.09
.98	1.05	1.12	.88		30	86.0	.81	.92	.96	.86	.84	.98	1.11
.97	1.06	1.14	.86		32	89.6	.77	.89	.95	.83	.81	.97	1.13
.97	1.07	1.17	.84		34	93.2	.73	.87	.94	.80	.77	.97	1.15
.96	1.07	1.19	.82		36	96.8	.69	.84	.93	.77	.74	.96	1.17
.95	1.08	1.21	.80		38	100.4	.65	.81	.91	.74	.70	.95	1.19
.94	1.08	1.23	.78		40	104.0	.61	.78	.89	.70	.67	.94	1.21
.93	1.09	1.26	.76		42	107.6	—	.74	.87	.67	.63	.93	1.22
.91	1.10	1.28	.74		44	111.2	—	.70	.85	.63	.60	.91	1.24
.89	1.10	1.30	.72		46	114.8	—	.64	.83	.61	.56	.89	1.25
.87	1.11	1.31	.70		48	118.4	—	.58	.82	.58	.53	.87	1.26
.86	1.11	1.33	.68		50	122.0	—	.52	.80	.56	.50	.86	1.27
.84	1.11	1.34	.66		52	125.6	—	—	.79	.53	.47	.84	1.28
.82	1.11	1.36	.64		54	129.2	—	—	.78	.51	.44	.82	1.29
.79	1.11	1.37	.62		56	132.8	—	—	.77	.49	.41	.79	1.30
.77	1.12	1.37	.60	↓	58	136.4	—	—	.76	.46	.38	.77	1.29
.75	1.12	1.38	.58	1.00	60	140.0	—	—	.74	.44	.36	.75	1.27

TMCF-4950

قيمة معامل التصحيح k وفقاً للكُتيّب التفصيلي الصادر عن شركة (**Doble**) والخاص بخطوات هذا الفحص **[Doble Test Procedure, 72A-2244 Rev.A]**

عوازل الإختراق (2/2)

doble

TABLE OF MULTIPLIERS FOR USE IN CONVERTING POWER FACTORS AT TEST TEMPERATURES TO POWER FACTORS AT 20°C (BUSHINGS – continued)

LAPP			McGRAW-EDISON	MICAFIL	MICANITE AND INSULATORS CO.				OHIO BRASS				PASSONI VILLA	WESTINGHOUSE		
Class[1] ERC 15–23 kV	Class PRC 15–69 kV	Class POC 15–765 kV	Types P, PA, PB	Types WTxF	25–69 kV	Above 69 kV	TEST TEMPERATURES °C	°F	Class G or L 46–138 kV	Class L 7.5–34.5 kV	Class GK 15–500 kV	Class LK 15–69 kV	Types PTAO, 3 PV.F 25–230 kV	Con-denser, except Type O	Types O O-Al OC	Types O+ and O + C
.90	.81	1.00	.68	–	1.55	1.13	0	32.0	1.54	1.29	.90	.85	.65	1.61	.88	.87
.91	.83	↑	.70	–	1.49	1.11	2	35.6	1.47	1.26	.91	.86	.69	1.52	.89	.89
.92	.86		.72	–	1.43	1.10	4	39.2	1.40	1.24	.91	.87	.74	1.44	.90	.91
.93	.88		.76	–	1.37	1.08	6	42.8	1.34	1.21	.92	.89	.78	1.36	.91	.92
.94	.89		.79	–	1.31	1.07	8	46.4	1.29	1.19	.92	.90	.82	1.30	.93	.93
.95	.92		.82	–	1.25	1.06	10	50.0	1.24	1.16	.93	.92	.86	1.23	.94	.94
.96	.94		.85	–	1.20	1.05	12	53.6	1.18	1.12	.94	.93	.89	1.18	.95	.95
.97	.95		.87	1.00	1.15	1.04	14	57.2	1.14	1.09	.95	.95	.92	1.13	.96	.96
.98	.97		.93	1.00	1.10	1.02	16	60.8	1.09	1.06	.97	.96	.95	1.09	.98	.98
.99	.98		.96	1.00	1.05	1.01	18	64.4	1.04	1.03	.98	.98	.97	1.04	.99	.99
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	20	68.0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
1.00	1.00		1.02		.96	.99	22	71.6	.95	.97	1.02	1.02	1.02	.96	1.01	1.01
1.01	1.03		1.10		.91	.98	24	75.2	.91	.94	1.04	1.04	1.05	.92	1.02	1.02
1.02	1.05		1.14		.87	.96	26	78.8	.88	.91	1.06	1.06	1.07	.88	1.04	1.03
1.02	1.07		1.18		.84	.95	28	82.4	.84	.88	1.09	1.08	1.09	.84	1.05	1.04
1.03	1.10		1.24		.80	.94	30	86.0	.80	.86	1.11	1.10	1.11	.81	1.06	1.05
1.03	1.11		1.29		.77	.93	32	89.6	.77	.83	1.13	1.12	1.13	.77	1.07	1.06
1.04	1.12		1.32	↓	.74	.92	34	93.2	.74	.80	1.15	1.14	1.16	.74	1.08	1.07
1.04	1.13		1.36	1.00	.70	.90	36	96.8	.71	.78	1.17	1.15	1.17	.70	1.08	1.07
1.05	1.14		1.41	.99	.67	.89	38	100.4	.68	.75	1.19	1.17	1.18	.67	1.09	1.08
1.05	1.15		1.45	.98	.64	.88	40	104.0	.65	.72	1.21	1.18	1.18	.64	1.09	1.08
1.05	1.15		1.50	.98	.61	.87	42	107.6	–	–	1.22	1.19	1.20	.62	1.10	1.09
1.06	1.15		1.55	.97	.58	.86	44	111.2	–	–	1.24	1.20	1.22	.59	1.11	1.10
1.06	1.15		1.58	.97	.55	.85	46	114.8	–	–	1.26	1.21	1.24	.56	1.11	1.10
1.07	1.14		1.61	.96	.52	.84	48	118.4	–	–	1.27	1.21	1.24	.53	1.10	1.11
1.07	1.13		1.65	.95	.50	.83	50	122.0	–	–	1.29	1.22	1.25	.51	1.10	1.11
1.07	1.11		1.67	.94	–	–	52	125.6	–	–	1.30	1.22	1.26	.50	1.10	1.11
1.08	1.09		1.67	.94	–	–	54	129.2	–	–	1.31	1.22	1.26	.48	1.09	1.11
1.08	1.07		1.67	.90	–	–	56	132.8	–	–	1.33	1.22	1.26	.47	1.08	1.11
1.07	1.06	↓	1.68	.90	–	–	58	136.4	–	–	1.34	1.21	1.26	.46	1.07	1.12
1.07	1.05	1.00	1.68	.92	–	–	60	140.0	–	–	1.35	1.21	1.25	.45	1.06	1.12

[1]This curve is applicable to those ERC bushings which were manufactured after March 1967 (S/N 3530 or higher).

TMCF-4950

الملحق (5-5)

مجموعة من القِيَم المَرجعيّة الخاصة بهذا الفحص وفقاً للنوع وللشركة المُصنّعة لعازل الإختراق (Bushing) كما ورد في النشرة التقنية [USBR, Testing and Maintenance of High-Voltage Bushings Vol 3-2].

Table 2. - Manufacturer's P. F. (power factor) limits for bushings			
Manufacturer	**Bushing type or class**	**Initial P.F. for new bushings, at**	**Dangerous P. F. value at 20 • C (%)**
General electric	A	6.0	8.0
	B	10.0	12.0
	F	1.5	2.0
	L	3.0	4.0
	LC	2.5	3.5
	OF	2.6	6.0
	S	3.5	6.0
	U	1.0	1.5
Lapp bushings	POC	0.5	
	PRC	0.7-1.2	
Ohio Brass manufactured prior to 1926 and after 1938	ODOF G L	1-10	Initial P.F. = 22
Ohio Brass manufactured 1926 to 1938, inclusive	ODOF G L	2-4	Initail P.F. = 16
Ohio Brass	Class GK type C	04.-0.6	
	Class LK type A	0.6-0.7	
Pennsylvania Transformer	P PA PB	0.5	1.0
Westinghouse	D		6.0
	O		1.4
	OCB & Inst. Trans. 69-kV and Below		3.5
	OCB & Inst. Trans. 92-kV to 138-kV		2.8
	Power & Dist. Trans. OCB & 161-kV to 288-kV.		2.0

الملحق (6-5)

بعض العوامل المؤثرة في نتيجة فحص معامل التبديد/القدرة والتي قد تؤدي لظهور نتائج فحص مرتفعة أو منخفضة جداً أو معامل قدرة ذو قيمة سالبة كما ورد في كتاب **[Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]**

مركبة العزل في المحول	الأسباب المحتملة لإرتفاع نتيجة فحص معامل القدرة أو إنخفاضها بشكل غير طبيعي أو ظهور معامل قدرة ذو قيمة سالبة
العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والأرض CH أو العزل بين ملفات الفولتية المنخفضة والأرض CL	✓ عدم فك الموصلات (القضبان) عن أطراف ملفات الفولتية المرتفعة/المنخفضة ✓ واحدة أو أكثر من عوازل الإختراق حالتها سيئة. ✓ تيار تسرب سطحي ذو قيمة مرتفعة نتيجة للظروف الجوية المحيطة. ✓ إستخدام المطاط لعزل أسلاك الفحص وللحصول على المسافة الكهربائية الفاصلة المناسبة. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض. (معامل قدرة ذو قيمة سالبة) ✓ الرطوبة (**Moisture**). ✓ مسار تأريض مادي غير مقصود. ✓ الملوثات (**Contamination**). ✓ التقادم (**Aging**). ✓ التفريغ الجزئي (**Partial Discharge**). ✓ حرارة الزيت العلوي.
العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة وملفات الفولتية المنخفضة CHL	✓ الرطوبة (**Moisture**). ✓ الملوثات (**Contamination**). ✓ التقادم (**Aging**). ✓ التفريغ الجزئي (**Partial Discharge**). ✓ واقي الملفات البينية متصل بالأرض.(معامل قدرة ذو قيمة سالبة) ✓ مسار تأريض مادي غير مقصود. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض.(معامل قدرة ذو قيمة سالبة) ✓ حرارة الزيت العلوي.

الملحق (7-5)

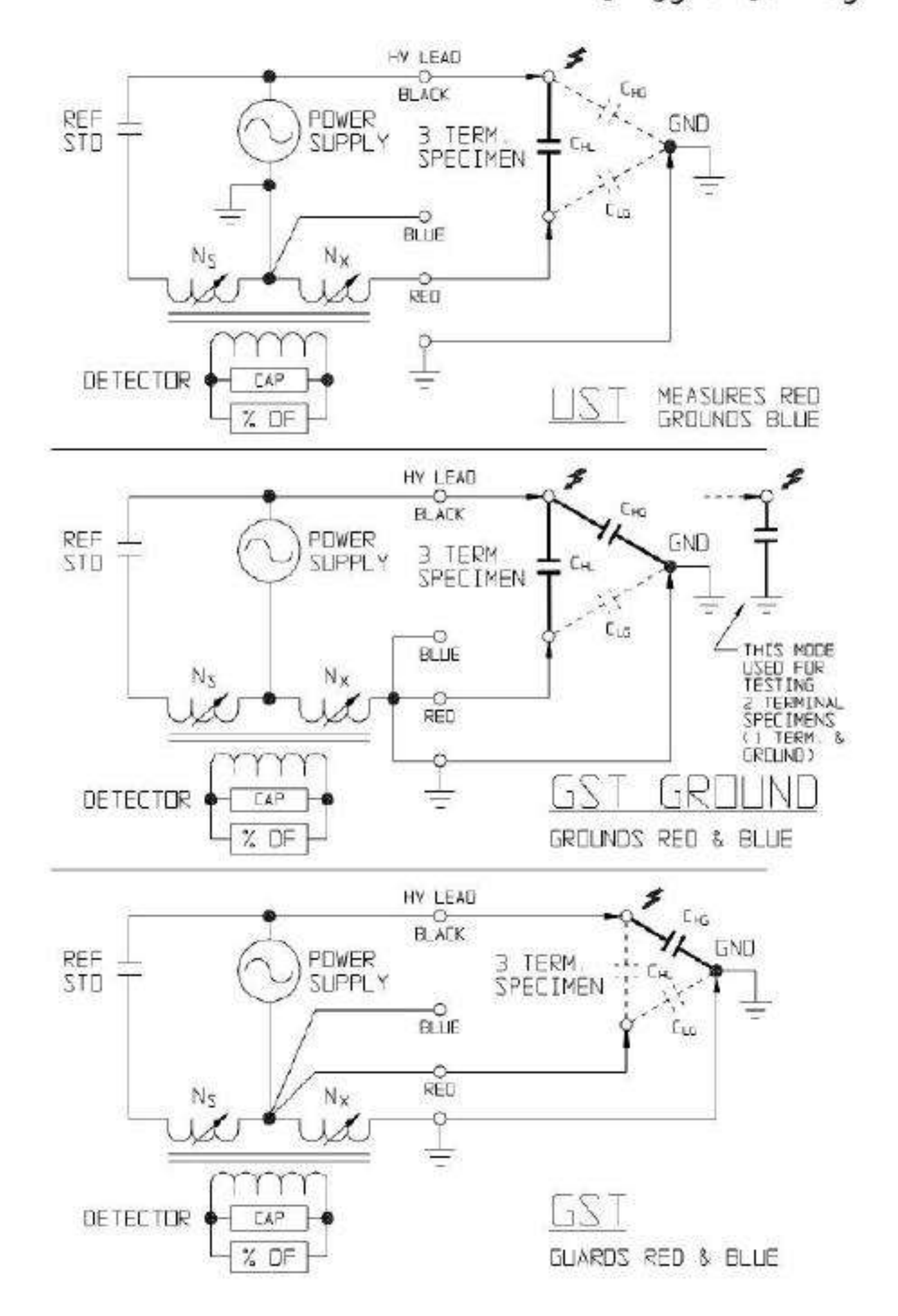
بعض العوامل المؤثرة في نتيجة فحص المواسعة كما ورد في كتاب [Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]

مركبة العزل في المحول	الأسباب المحتملة لتغيُّر قيمة فحص المواسعة
العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة والأرض CH	✓ عدم فك الموصلات (القضبان) عن أطراف ملفات الفولتية المرتفعة/المنخفضة (زيادة في المواسعة) ✓ تشوه في ملفات الفولتية المرتفعة. ✓ تغيير عوازل إختراق الفولتية المرتفعة بأُخرى ذات أبعاد هندسية مختلفة. ✓ أسلوب فحص (Test mode) خاطئ. ✓ خزان محول مفرغ من الزيت. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض.
العزل بين ملفات الفولتية المرتفعة وملفات الفولتية المنخفضة CHL	✓ تشوه في ملفات المحول. ✓ أسلوب فحص (Test mode) خاطئ. ✓ خزان محول مفرغ من الزيت. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض.
العزل بين ملفات الفولتية المنخفضة والأرض CL	✓ عدم فك الموصلات (القضبان) عن أطراف ملفات الفولتية المرتفعة/المنخفضة (زيادة في المواسعة) ✓ تشوه في ملفات الفولتية المنخفضة. ✓ قلب حديدي غير متصل بالأرض. (إنخفاض في المواسعة) ✓ تغيير عوازل إختراق الفولتية المنخفضة بأُخرى ذات أبعاد هندسية مختلفة. ✓ أسلوب فحص (Test mode) خاطئ. ✓ خزان محول مفرغ من الزيت. ✓ خزان محول غير متصل بالأرض.

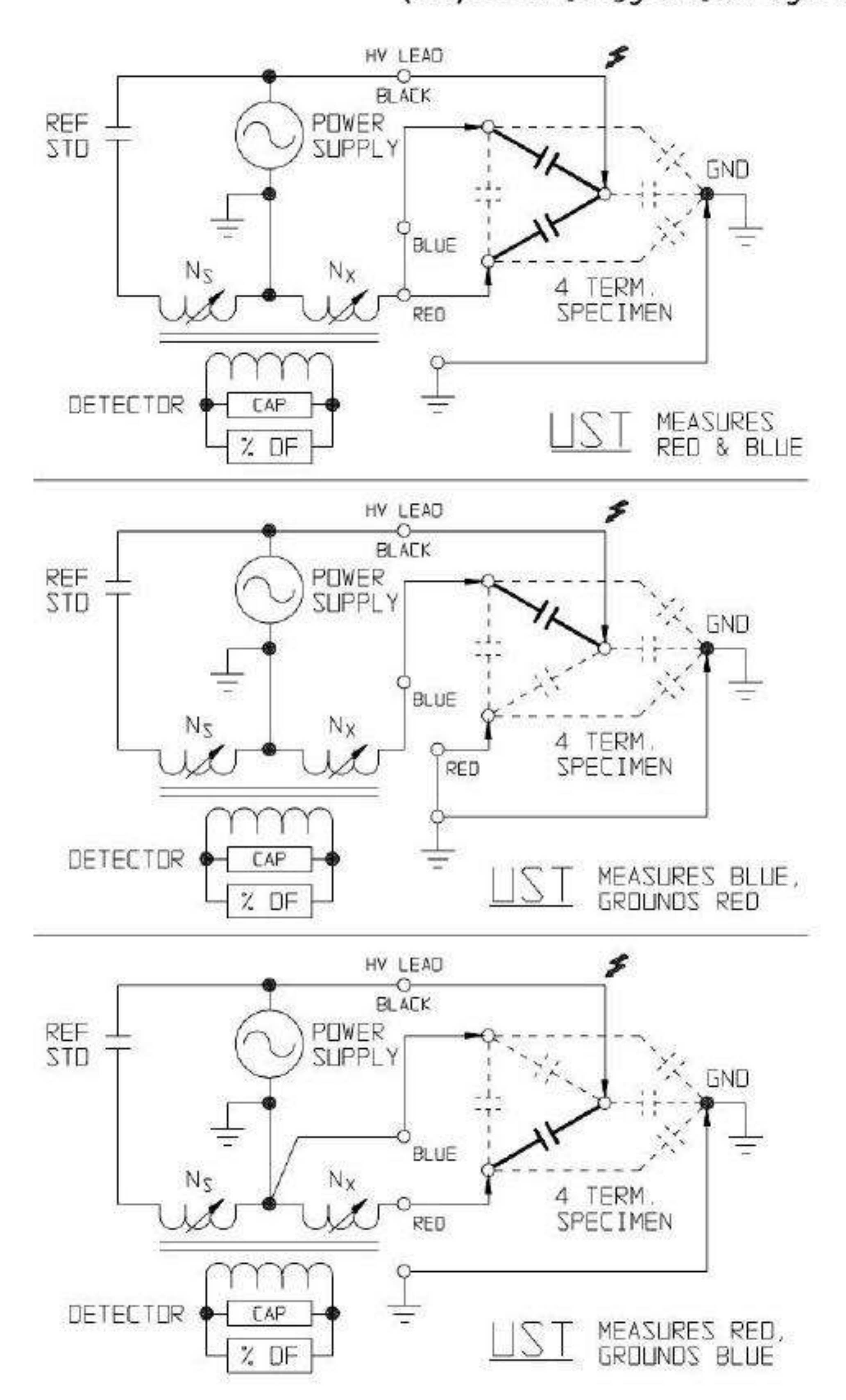
الملحق (8-5)

بالرجوع إلى الكُتيب التفصيلي لجهاز الفحص (**DETL2000**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**) يُمكن إيجاد توصيلات أساليب الفحص المختلفة والتي يتم التوضيح من خلالها كيفية ربط أطراف الجهاز خارجياً وداخلياً كالآتي:

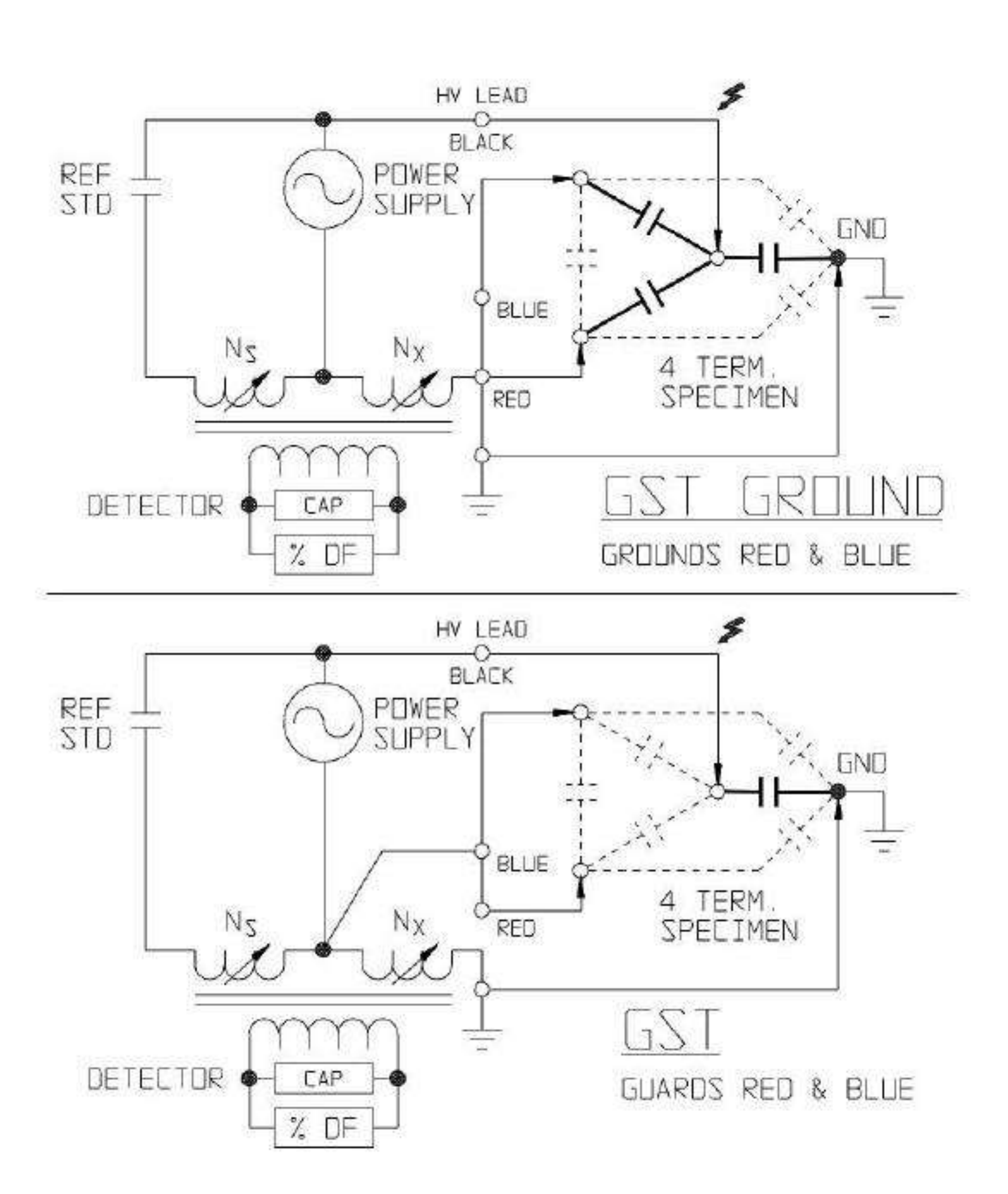
✓ **المحولات ثلاثية الأطوار ثنائية الملفات**



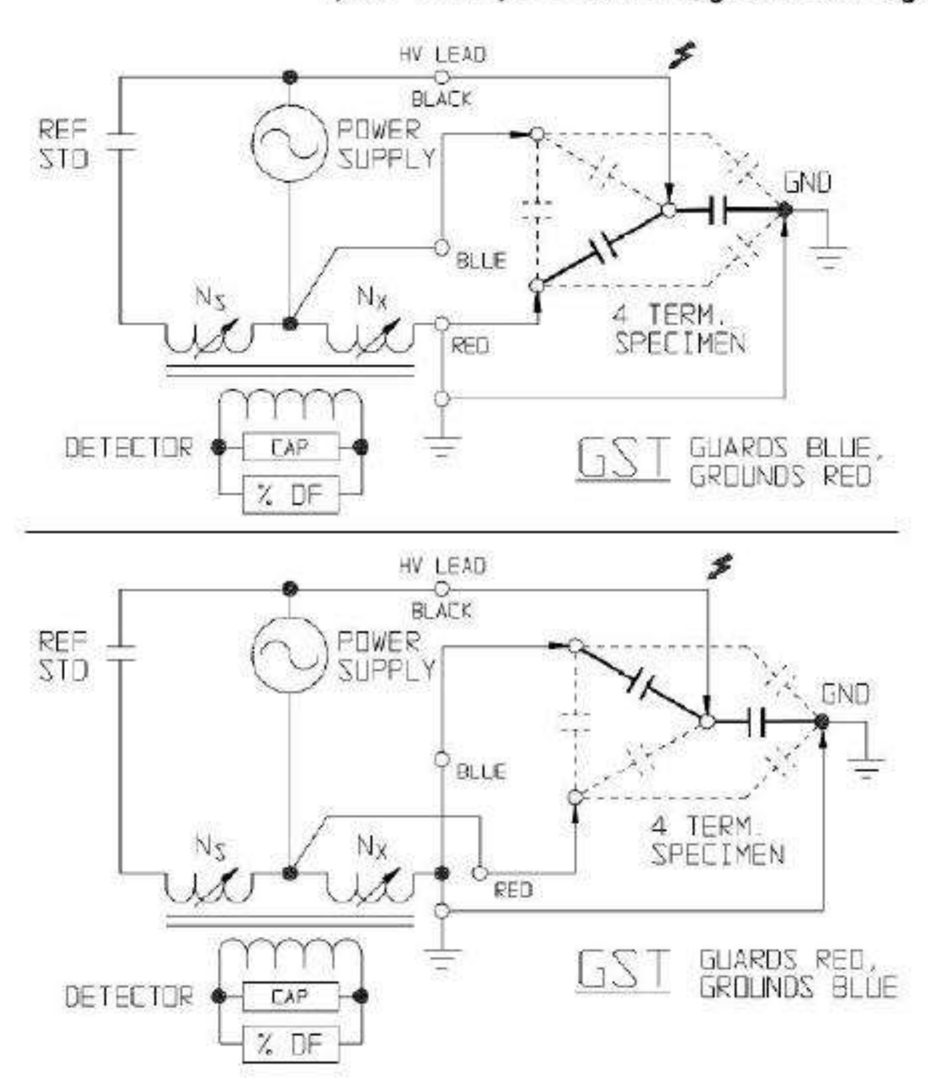
✓ المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (UST)



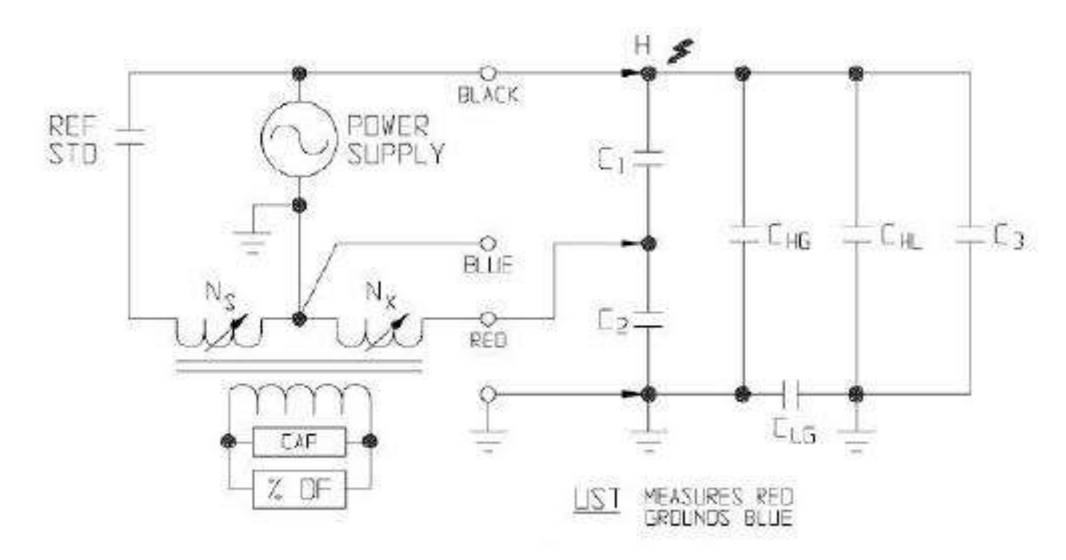
✓ المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (GST)



✓ المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (GST-Guard)



✓ عوازل الإختراق (UST)



الفصل السادس

فحص تيار التهييج

Excitation Current Test



فحص تيار التهييج
Excitation Current Test

يُعتبر فحص تيار التهييج أو كما يُسمى تيار المغنطة من الفحوصات المُهمة لمعرفة الحالة الداخلية للمحول خاصة حالة القلب الحديدي لهذا المحول، حيث يُعبّر هذا الفحص عن كمية الطاقة الضائعة في القلب الحديدي للمحول عند حقن أحد ملفاته بفولتية مترددة في حين باقي ملفاته مفتوحة (أي غير موصولة بحمل)، أو بمعنى آخر فإنه يُعبّر عن الطاقة اللازمة ليقوم المحول بعمله وهو بناء فولتية على أطرافه الثانوية نتيجة لتطبيق فولتية مترددة على أطرافه الإبتدائية دون إتصال كهربائي وهو ما يُسمى بال(**Transformer action**)، ويتم معرفة قيمة هذه الطاقة الضائعة عن طريق قياس قيمة التيار اللازم لمغنطة القلب الحديدي للمحول وهو ما يُشار إليه بتيار التهييج أو المغنطة أو تيار اللاحمل. كما ويُمثل هذا الفحص النسخة الموقعيّة (**Site test**) من فحص الدائرة المفتوحة المَصنعي (**Open circuit test**) من حيث المبدأ مع وجود تغيرات في طريقة الفحص. ونظراً لأن مقدار فولتية الفحص أقل من مقدار الفولتية الإسمية للمحول فإن هذا الفحص يُعد من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**) أي أنه لا يؤثر على سلامة المادة العازلة في المحول.

في المحولات المثالية تكون الطاقة الداخلة (**Energy in**) مساوية للطاقة الخارجة (**Energy out**)، ولكن بالواقع لا يوجد ما يُسمى بالمحول المثالي وذلك لوجود مكونات بالمحول تستهلك طاقة على شكل ضياعات في حالتي الحمل (**Load**) واللاحمل (**No-load**) والتي من شأنها عمل فرق بين الطاقة الداخلة للمحول والخارجة منه، ونظراً لأن هذا الفحص يتم إجراؤه أثناء فتح أطراف الملفات الثانوية للمحول فإنه يُعطي قيمة ضياعات اللاحمل أو كما تُسمى بالضياعات الثابتة أو ضياعات القلب (**Core losses**) دون التطرُق لضياعات الحمل (**Load losses**) لأنها تعتمد على قيمة التيار (I^2R) بشكل رئيسي، في حين أن التيار في هذا الفحص ذو قيمة صغيرة بالملي أمبير (**mA**) مما يعني ضياعات حمل ذات قيمة يُمكن إهمالها. وتعتمد ضياعات اللاحمل (**No-load losses**) على نوع المادة وتشكيلها الهندسي ومنه فإن أي تغيُّر في قيمة هذا الفحص يَعكس إختلاف في الحالة الداخلية للمحول ووجود أعطال.

وكما ذكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل والنظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أيٍ من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكّن من الكشف عن سلامة جميع الأنظمة سابقة الذِكر.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعُنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أُخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المَصنعيّة (Quality Control - QC) وكذلك يُعتبر من فحوصات القُبول المَصنعيّة (Factory Acceptance Test - FAT) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهربة المحول للمرة الأولى (Transformer first energization) كأحد فحوصات القُبول المَوقعيّة (Site Acceptance Test - SAT) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 بشكل روتيني (Routine test) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (Reference value).

1.4 تحديد الأعطال داخل المحول (Fault detection - Diagnostic test)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال حدوث فصل قَسري للمحول (Trip) نتيجة لتفعّل مُرحل البوخلز (Buchholz Relay) أو في حال إرتفاع درجة حرارة المحول أو في حال ظهور نتائج غير مُرضية لفحص الغازات الذائبة في الزيت (Dissolved Gas Analysis - DGA) خاصة عند ظهور غازات الـ(الميثان – CH_4 و الإيثان – C_2H_6 و الإيثيلين – C_2H_4) مُجتمعة والتي يُطلق عليها غازات إحماء المعدن (Hot metal gases) وعادة ما تكون ناتجة عن إحماء القلب الحديدي للمحول.

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود قَطع في ملفات المحول (Open circuit).
- وجود دائرة قِصَر (Short circuit) بين لفات ملفات المحول أو بين الملفات والأرض.
- وجود نقاط توصيل رديئة (Poor connection).
- وجود أعطال في القلب الحديدي (Iron core) والذي يُمثل الدائرة المغناطيسية للمحول كوجود مشكلة في تأريض هذا القلب الحديدي أو فشل العزل بين الصفائح الرقيقة المكوّنة للقلب أو أي عطل يؤدي إلى إرتفاع قيمة ممانعة القلب الحديدي (Reluctance) لسريان الفيض المغناطيسي.
- وجود أعطال في مُغيّر الخطوة (Tap changer):
  - تكربُن أو تآكل الملامسات.
  - وجود إرتخاء (Loose) في ملامساته المتحركة.
  - فقدان المحاذاة (Misalignment).
  - توصيل خاطئ بين مُغيّر الخطوة وملفات المحول.
  - توصيل معكوس لأطراف الـ(PA transformer) لمُغيّرات الخطوة من النوع الـ(Reactive)
  - وجود قَطع (OC) أو دائرة قِصَر (SC) في ملفات الـ(PA Transformer) لمُغيّرات الخطوة من النوع الـ(Reactive).

3. فلسفة الفحص

تكمُن فلسفة هذا الفحص في تطبيق فولتية مترددة آحادية الطور (**Single phase**) على أحد أطوار ملفات المحول، وعادةً ما تكون ملفات الفولتية المرتفعة مع إبقاء ملفات الفولتية المنخفضة مفتوحة (عدا نقطة التعادل إن وجدت)، ومن ثم يتم قياس التيار المار في الملفات المُطبق عليها الفولتية المترددة (عادة ملفات الفولتية المرتفعة) بالإضافة إلى إمكانية قياس الخسائر في القدرة (**Watt loss**) على هذه الملفات.

ولكن وقبل الخوض بتفاصيل الفحص وجب التذكير بمبدأ عمل المحول الكهربائي، ولزيادة الفهم سنبدأ بشرح مبدأ عمل المحول الكهربائي المثالي (**Ideal Transformer**) عديم الضياعات. يعمل المحول المثالي وفقاً لظاهرة الحث الكهرومغناطيسي حيث أن ملفاته الإبتدائية تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية والمُتمثلة بالفولتية المترددة المُطبقة والتيار الذي يَسري في ملفاته الإبتدائية إلى فيض مغناطيسي ينتقل عبر القلب الحديدي إلى الملفات الثانوية، ومن ثم يتم تحويل هذا الفيض المغناطيسي إلى طاقة كهربائية مرة أخرى مُتمثلة بفولتية مترددة على أطرافه الثانوية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية (**Electro-Motive Force EMF –** e) حسب قانوني فارادى-نيومان و لينز وفقاً للمعادلة التالية:

$$e = -n\,\frac{d\phi}{dt} \qquad \textbf{(6.1)}$$

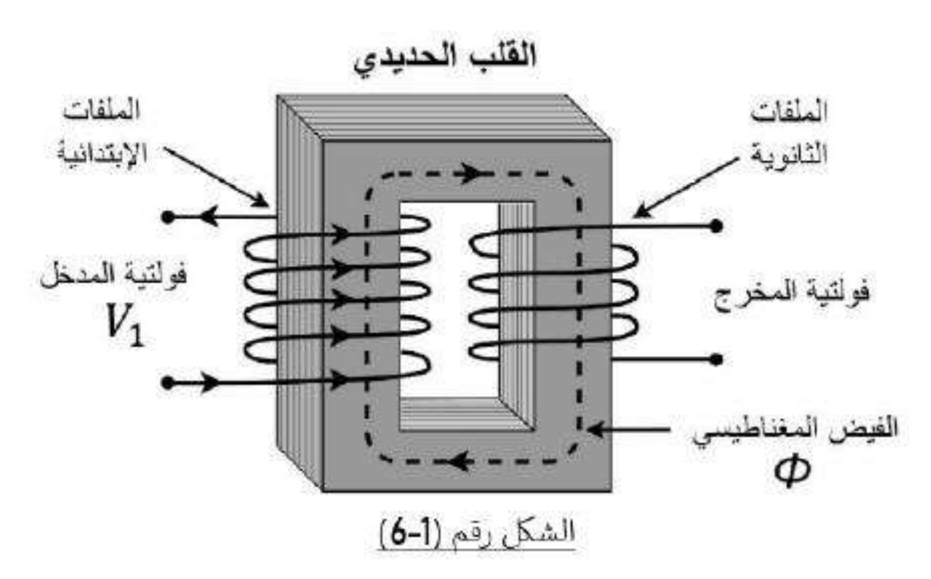
حيث**:**

e : القيمة اللحظية للقوة الدافعة الكهربائية المُتولدة نتيجة للتغيُّر في الفيض المغناطيسي.

n : عدد اللفات.

$\frac{d\phi}{dt}$: معدل تغيُّر الفيض المغناطيسي مع الزمن.

ومنه يُمكن ملاحظة أن القوة الدافعة الكهربائية (**EMF –** e) الناشئة في سِلك ضمن دائرة مُغلقة تتناسب مع مقدار التغيُّر في الفيض المغناطيسي الذي يتعرض له السِلك (قانون فارادى-نيومان) وتكون هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة للفيض الذي أنشأها (قانون لينز)، لذلك وضِعَت إشارة السالب في المعادلة **(6.1)** السابقة.



الشكل رقم **(6-1)**

وبما أن الفولتية المُطبقة على الملف الإبتدائي (V_1) على شكل موجة جَيبية، فإن الفيض المُتكوِّن سيكون جَيبي أيضاً $(\phi = \phi_M \sin(\omega t))$ حيث (ϕ_M) تُعبّر عن قيمة الفيض العُظمى (**Peak value**).

$$e = -n \frac{d\phi_M \sin(\omega t)}{dt} \quad \textbf{(6.2)}$$

$$e = -n\,\omega\,\phi_M \cos(\omega t) \quad \textbf{(6.3)}$$

ولأن قيمة القوة الدافعة الكهربائية (e) قيمة مُتفاوتة كما هو موضح بالمعادلة (**6.3**) السابقة بدلالة وجود $(\cos(\omega t))$ في المعادلة، فلا بُد من إيجاد قيمة الجذر التربيعي لمتوسط القِيَم المربعة (**Root Mean Square – RMS**) وذلك بالقسمة على الجذر التربيعي للعدد (**2**)، حتى يتسنى لنا التعامل حسابياً مع هذه القيمة بسهولة ويُسر.

$$E = -\frac{n\,\omega\,\phi_M}{\sqrt{2}} \quad \textbf{(6.4)}$$

بتعويض قيمة السرعة الزاوية (**Angular speed – ω**) المساوية لـ$(2\pi f)$ بالمعادلة، حيث (f) تُعبّر عن التردد لتصبح المعادلة كالتالي:

$$E = -4.44\,n\,\phi_M\,f \quad \textbf{(6.5)}$$

كما ويُمكن الإستعاضة عن قيمة الفيض العظمى (ϕ_M) بقيمة كثافة الفيض العظمى (B_M) مضروبة بمساحة المقطع العرضي للقلب الحديدي (A) الذي تقطعه خطوط مجال هذا الفيض لتصبح المعادلة كالآتي:

$$E = -4.44\,n\,B_M\,A\,f \quad \textbf{(6.6)}$$

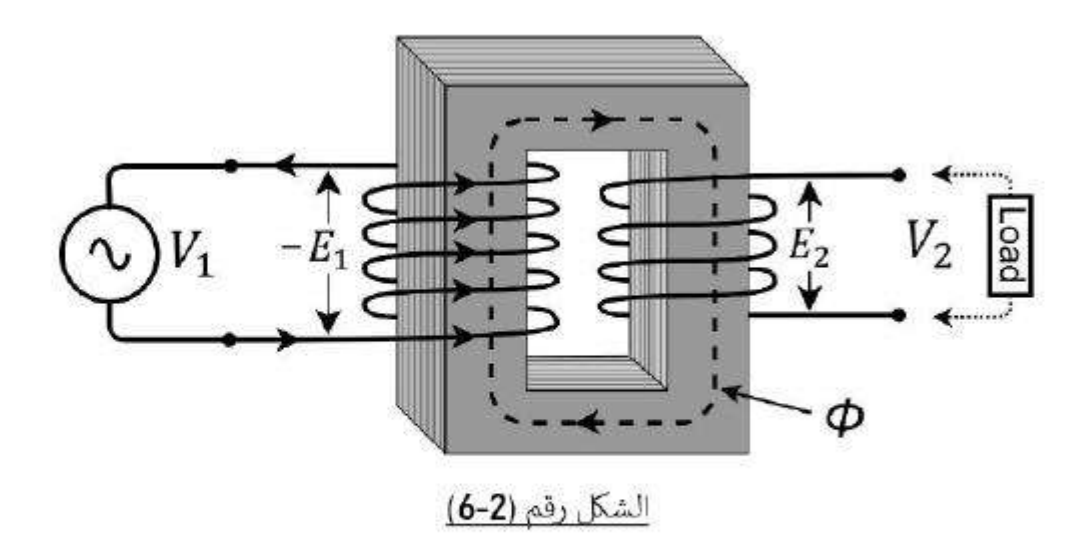
وبذلك نكون قد وصلنا للمعادلتان اللتان توضحان مقدار القوة الدافعة المتولدة في الملفات الإبتدائية والثانوية بالترتيب:

$$E_1 = -4.44\,n_1\,\varphi_M\,f \quad \textbf{(6.7)}$$

$$E_2 = -4.44\,n_2\,\varphi_M\,f \quad \textbf{(6.8)}$$

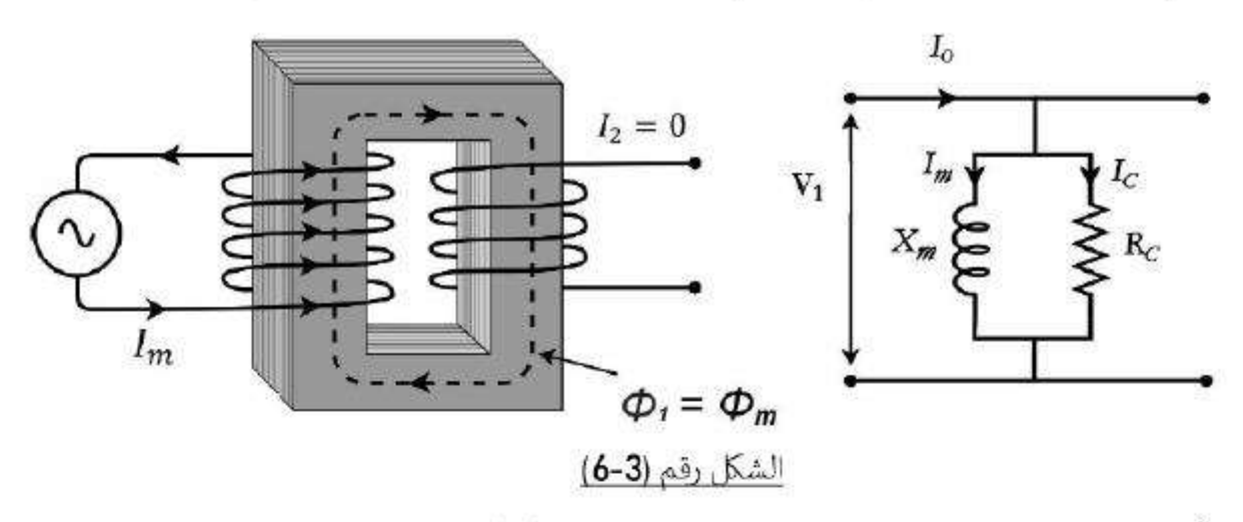
وبقسمة المعادلة (**6.7**) على المعادلة (**6.8**) تظهر العلاقة بين الفولتية وعدد اللفات في المحولات المثالية وفقاً للمعادلة التالية:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \textbf{(6.9)}$$



الشكل رقم **(6-2)**

ولأن هذا الفحص يتم أثناء فتح دائرة الملفات الثانوية للمحول – أي أنه غير متصل بحمل عبر ملفات الثانوية – وهو ما يُسمى بحالة اللاحمل (**No-Load**)، فإنه في هذه الحالة وعند تطبيق الفولتية المترددة على أطراف المحول المثالي الإبتدائية ينشأ تيار بهذه الملفات الإبتدائية ذو قيمة عالية (**Inrush current**) من شأنه تكوين فيض مغناطيسي مُتغيّر داخل القلب الحديدي والذي يؤدي بدوره لتشبُّع القلب الحديدي ثم ينخفض هذا التيار إلى قيمة قليلة ويثبت عليها وهو ما يُسمى بتيار التهييج أو المغنطة (**Magnetization Current -** I_m) في هذه الملفات مُنتجاً فيض مغناطيسي إبتدائي (ϕ_1)، وفي حالتنا هذه - حالة اللاحمل - يُكون هو نفسه الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) وذلك لعدم وجود فيض مغناطيسي ثانوي (ϕ_2) نتيجة لعدم مرور تيار في الدائرة الثانوية المفتوحة للمحول -لعدم وجود حمل-.



الشكل رقم **(6-3)**

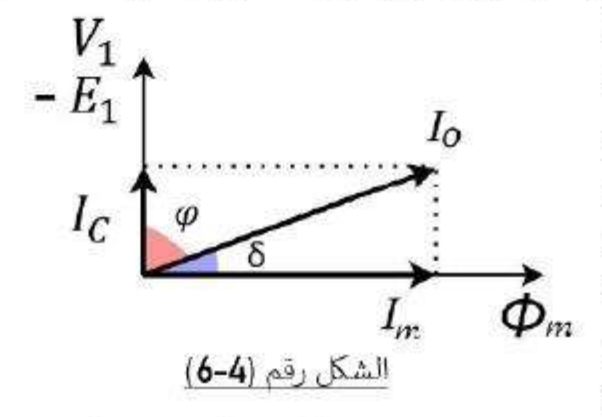
حيث أن هذا الفيض المغناطيسي المشترك (ϕ_m) الذي ينتقل بشكل كامل إلى الملفات الثانوية عبر القلب الحديدي مُؤدياً إلى ظهور قوة دافعة كهربائية معاكسة ($-E_1$ و E_2) في الملفات الإبتدائية و الثانوية نتيجة لقطع هذا المجال لهذين الملفين.

فلو نظرنا إلى الملفات الإبتدائية سنجد قيمتين للفولتية، إحداهما قيمة الفولتية المُطبقة - فولتية المصدر - و المشار إليها بالرمز (V_1) و الأُخرى هي الفولتية المتولدة نتيجة لتأثير الفيض المشترك (ϕ_m) على الملفات الإبتدائية أو ما يُسمى بالقوة الدافعة الكهربائية (E_1-)كما هو مبين بالشكل (**6-2**)، حيث تكون هذه القوة الدافعة الكهربائية مُعاكسة لقيمة الفولتية المُطبقة (V_1) حسب قانون لنز، أي أن الفولتية

المُحصلة ($V_1 - E_1$) المُطبقة على الملفات الإبتدائية تكون قليلة مما يُفسر ظهور تيار تهييج أو مغنطة قليل ($\downarrow I_m$) وهذا ما يُعرف بظاهرة القوة الدافعة الكهربائية المُعاكسة (**Back EMF**). ويكون هذا التيار مُطابق مُتجهياً (**in-phase**) للفيض المغناطيسي المُشترك (**ϕ_m**) ومُزاح مُتجهياً بمقدار (**-90°**) عن القوة الدافعة الكهربائية (-E_1).

أما فيما يَخُص الملفات الثانوية، فإن الفيض المُشترك (**ϕ_m**) سيؤدي لظهور قوة دافعة كهربائية (E_2) على أطراف هذه الملفات كما هو مُبين بالشكل (**6-2**) السابق.

ولأن المحولات المثالية (**Ideal Transformers**) غير موجود بالواقع وذلك لوجود ضياعات داخل المحول نتيجة للتيارات الدوامية (**Eddy currents**) في القلب الحديدي وأيضاً لوجود الخاصية الهستيرية (**Hysteresis**) الناتجة عن تغيُّر إتجاه قطبية جزيئات المادة المكوَّنة للقلب الحديدي تبعاً لتغيُّر قطبية الفولتية المُطبقة (**AC Voltage**) والذي يكون على شكل مغناطيسية متبقية (**Residual flux**) مما يعني ضياعات إضافية في القوة المغناطيسية داخل القلب الحديدي، وبعد تطبيق الفولتية المُترددة على الملفات الإبتدائية فهنالك مُركّبة تيار أُخرى تنشأ بالإضافة إلى تيار التهييج أو المغنطة (I_m) سابق الذِكر وهو تيار ضياعات القدرة أو القلب (**Power/Core Loss current**) أو ما يُسمى أيضاً بتيار الضياعات الثابتة (**Fixed Loss current**) ويُرمز له بالرمز (I_C) ويكون مُزاح مُتجهياً بمقدار (**+90°**) عن الفيض المغناطيسي (**ϕ_m**) ومُطابق مُتجهياً (**in-phase**) للقوة الدافعة الكهربائية (-E_1) وذو قيمة أقل من تيار التهييج - المغنطة - (I_m) كما هو مبين بالشكل (**6-4**)، والمَجموع المُتجهي (**Vector sum**) لهاذين التيارين (I_C) و (I_m) يُساوي تيار اللاحمل أو الدائرة المفتوحة (**No-Load/Open Circuit current - I_O**) والذي يكون مُزاح مُتجهياً عن الفيض المُشترك (**ϕ_m**) بزاوية تُسمى زاوية الضياعات (**Loss Angle - δ**)، ومُزاح متجهياً عن القوة الدافعة الكهربائية بزاوية تُسمى زاوية الطور (**Phase Angle - φ**)، ويكون أيضاً ذو قيمة قليلة إذ يتروح مقداره (**3% - 1%**) من التيار الإسمي للمحول الكبيرة.

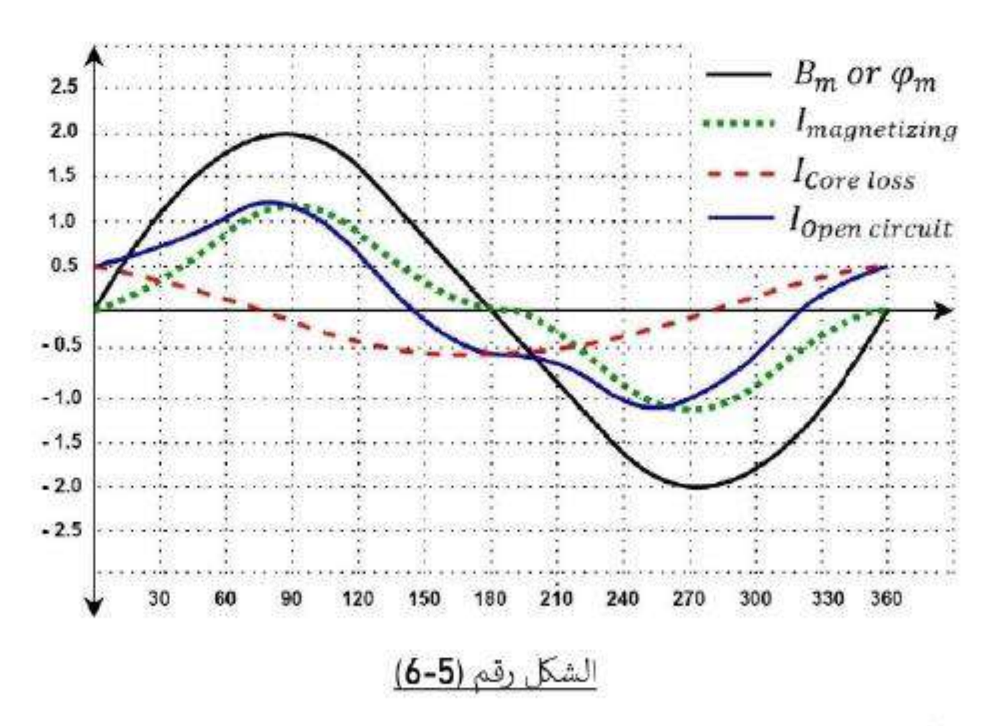


الشكل رقم (**6-4**)

$$I_{Open\ circuit} = I_{magnetizing} + I_{Core\ loss}$$

حيث أن:

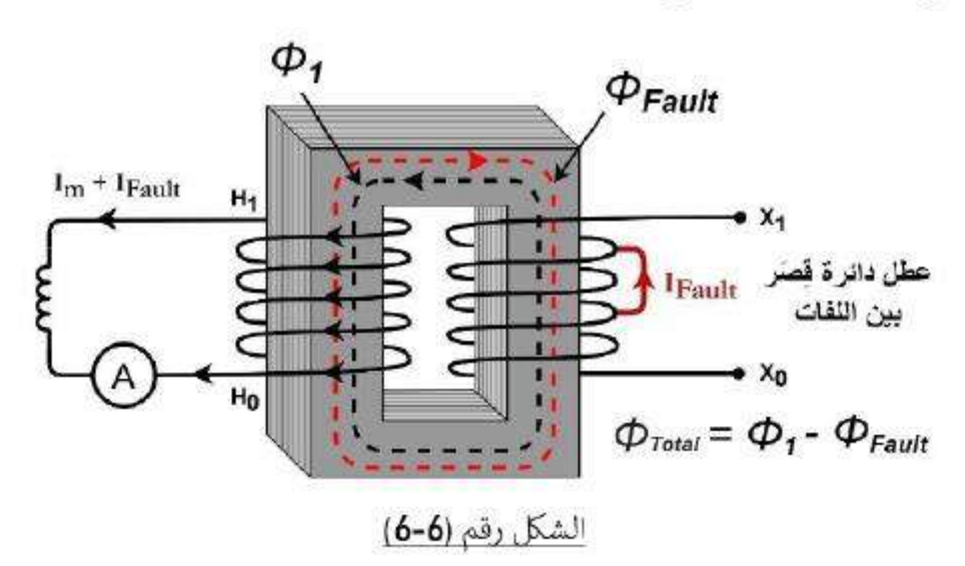
$$I_{Core\ loss} = I_{Eddy} + I_{Hysteresis}$$



الشكل رقم (5-6)

- **كيف يَدُل هذا الفحص على وجود مشكلة في العزل بين اللفات وكذلك مشاكل القلب الحديدي للمحول:**

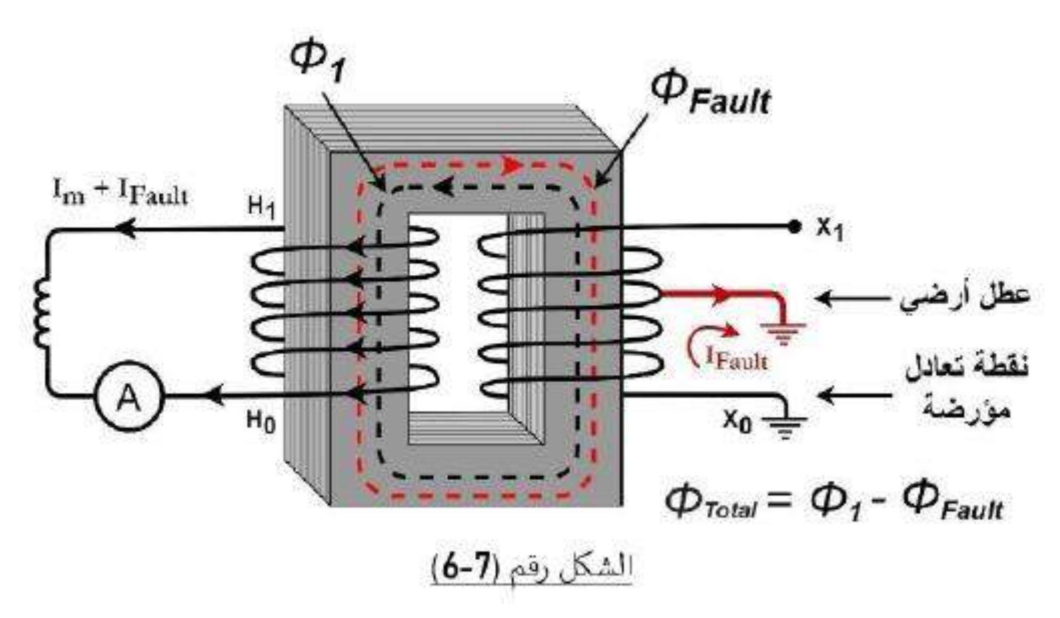
في ثنايا شرح فلسفة الفحص تمت الإجابة عن هذا التساؤل بالكامل بشكل غير مباشر، فكما ذُكر سابقاً فإن قيمة التيار في الملفات الإبتدائية (I_1) تعتمد على قيمة التيار في الملفات الثانوية (I_2)، لذلك عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات المحول الإبتدائية مع مراعاة فتح أطراف الملفات الثانوية (كما هو الحال في هذا الفحص) يكون التيار في الملفات الثانوية (I_2) مساوٍ للصفر مما يعني أن التيار في الملفات الإبتدائية سيكون مساوٍ لـ(I_O) وهو تيار التهييج أو اللاحمل فقط.



الشكل رقم (6-6)

أما في حال حدوث قِصَر بين لفات الملفات الثانوية (**Turn to turn fault**) كما هو مُبين في الشكل **(6-6)** أو حدوث قِصَر بين لفات الملف الثانوي والأرض كما هو مبين في الشكل **(6-7)**، فإنه سينتج عن هذا القِصر تيار يَسرى في الملفات الثانوية (I_2) أي أنه سيصبح للتيار (I_2) قيمة غير مساوية للصفر وسنرمز لها بـ(I_{fault})، ونتيجة لذلك فإن هذا التيار سوف يُنتِج فيض عطل (ϕ_{fault}) معاكس للفيض الإبتدائي (ϕ_1)

أو (ϕ_m) خافضاً قيمة الـ(E_1) ورافعاً قيمة الفولتية على أطراف الملفات الإبتدائية (V_{net}) الناتجة عن $(V_1 - E_1)$، ويتلازم مع ما سبق إرتفاع في قيمة تيار التهييج في الملفات الإبتدائية (I_O) - إضافة مركبة تيار جديده لتيار التهييج مع بقاء قيمة تيار التهييج ثابتة – وهذا بدوره يدُل على وجود هذا النوع من الأعطل (القِصر بين اللفات) في ملفات المحول الثانوية.



الشكل رقم (6-7)

وكذلك الحال عند حدوث عطل في القلب الحديدي (**Iron core**) أدى الى إرتفاع قيمة ممانعة القلب (**Reluctance** - ξ) لسريان الفيض المغناطيسي (ϕ_1) أو (ϕ_m) كحدوث تغيير في تركيبة القلب الحديدي للمحول ناتج عن تغيير للطول المسار الحامل للمغناطيسية أو تغيُّر في مساحة مقطع القلب الحديدي وفقاً للمعادلة التالية التي تُبيّن أن أي تغيير فيزيائي (ميكانيكي) لتركيب القلب الحديدي سينعكس على قيمة ممانعة القلب (**Reluctance** - ξ).

$$\xi = {}^{l}/_{\mu A} \qquad (6.10)$$

حيث؛

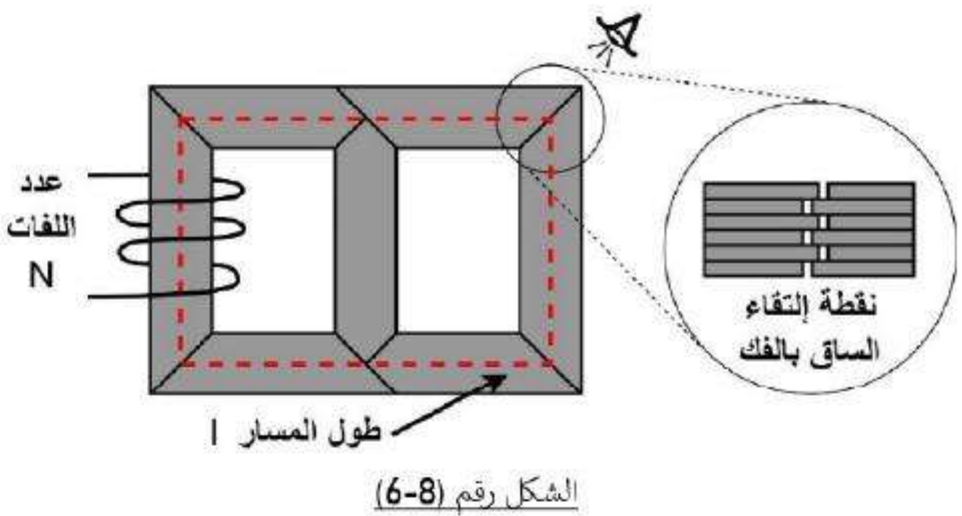
ξ : مُمانعة القلب الحديدي لمرور الفيض المغناطيسي (**Reluctance**).

l : طول المسار المغناطيسي داخل القلب الحديدي.

A : مساحة المقطع العرضي للقلب الحديدي.

μ : النفاذية المغناطيسية للمادة المُكوّنة للقلب الحديدي (**Permeability**).

بالإضافة إلى أي تغيير قد يحدث على نقطة الإتصال بين الساق (**Limb**) و الفك (**Yoke**) حيث تمثل هذه النقطة المكان الأكثر تأثيراً على قيمة مُمانعة القلب الحديدي لسريان الفيض المغناطيسي.



الشكل رقم (6-8)

وهذا التغيُّر في قيمة مُمانعة القلب الحديدي (ξ – **Reluctance**) يؤدي إلى إرتفاع في قيمة تيار التهييج في الملفات الإبتدائية (I_O) - إضافة مركبة تيار جديدة لتيار التهييج مع بقاء قيمة تيار التهييج ثابتة - وفقاً للمعادلة (**6.11**) التالية للحفاظ على قيمة الفيض المغناطيسي الإسمي للمحول (ϕ_1) أو (ϕ_m) ثابتة، مما وهذا بدوره يَدُل على وجود عطل في القلب الحديدي (**Iron core**) للمحول.

$$\phi_m = {}^{mmf}/_{\xi} = {}^{N.I}/_{\xi} \qquad \textbf{(6.11)}$$

حيث:

mmf : القوة الدافعة المغناطيسية (**Magnetomotive Force**).

ϕ_m : الفيض المغناطيسي المشترك.

ξ : مُمانعة القلب الحديدي لمرور الفيض المغناطيسي (**Reluctance**).

N : عدد اللفات.

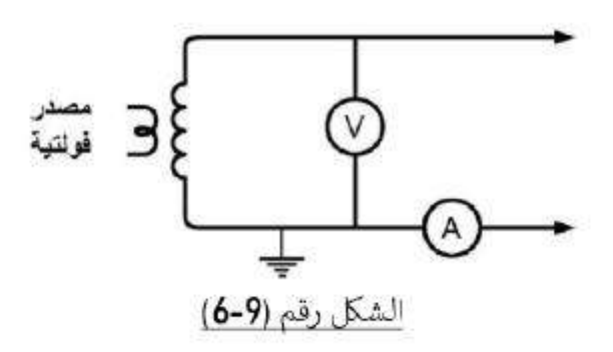
I : التيار.

4. طُرق الفحص

هنالك عدة طُرق يُمكن من خلالها إجراء هذا الفحص بحيث يتم إعتماد الطريقة وفقاً للتجهيزات الموجودة بالموقع وتوافرية المُعدات اللازمة لهذا الفحص:

4.1 الطريقة التقليدية:

تُعد هذه الطريقة الأبسط في قياس تيار التهييج وذلك بإستخدام مصدر فولتية مترددة آحادي الطور ذو فولتية تصل (**10kV**) كيلوفولت وتردد (**50Hz**) هيرتز مع دائرة لقياس التيار بالملي أمبير (**mA**)، بحيث تُتيح دائرة الفحص تطبيق أسلوب العيّنة غير المؤرضة (**UST**) أي قياس التيار الراجع في دائرة الفحص (**LV cable**) وأي تيارات أُخرى يتم تحيدها عبر الـ(**Ground Guard**) كما هو مُبين بالشكل (**6-9**) الذي يوضح دائرة فحص مُبسطة مكونة من مصدر فولتية ومقياس فولتية وتيار.

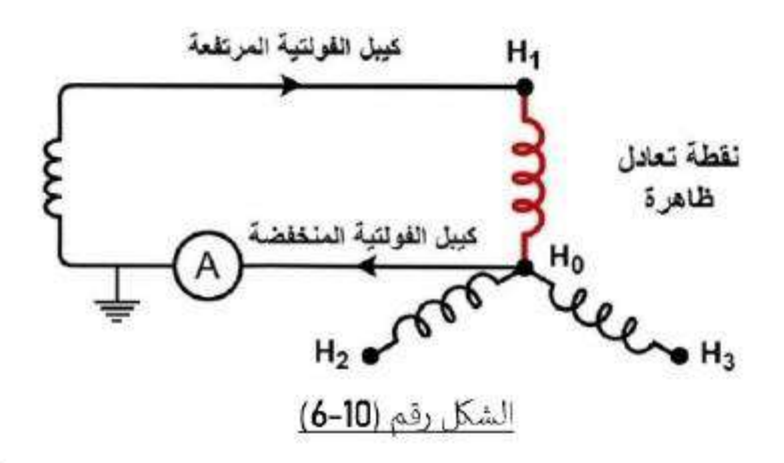


الشكل رقم (6-9)

وتعتمد طريقة توصيل مصدر الفولتية بالمحول على نوع توصيلة ملفات المحول الداخلية كالآتي:

- **ملفات محول موصولة على شكل نجمة (Star – Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) يُمكن الوصول إليها (ظاهرة).**

الشكل (**6-10**) يوضح توصيلة مصدر الفحص بملفات محول موصولة على شكل نجمة (**Star – Y**) ذات نقطة تعادل (**Neutral point**) يُمكن الوصول إليها (ظاهرة).



الشكل رقم (6-10)

الجدول (**6-1**) يُبين الأطراف التي يجب حقنها بالفولتية المترددة والأطراف الواجب تأريضها بالإضافة للأطراف الواجب تركها مفتوحة.

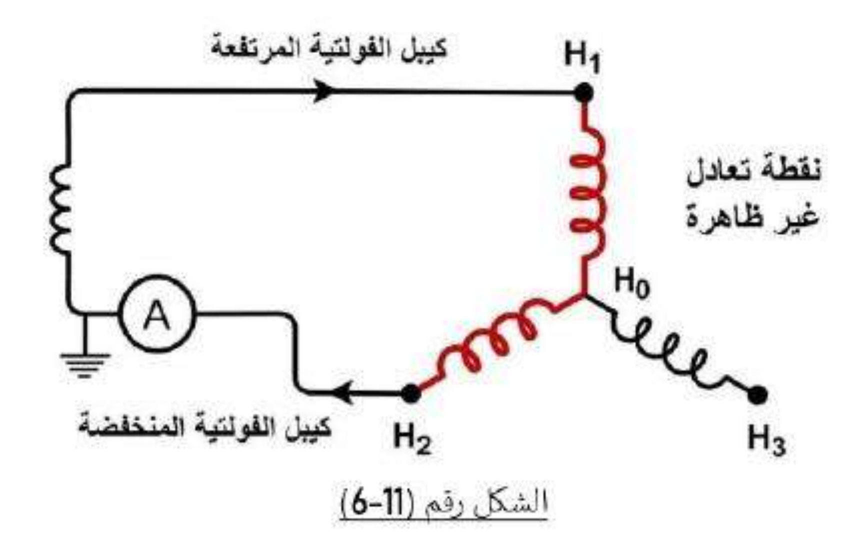
الجدول رقم (6-1)

أطراف الحقن	أطراف القياس	أسلوب الفحص	الأطراف المؤرضة	الأطراف المفتوحة
H1	H0	UST	X0* Y0*	H2H3 X1X2X3 Y1Y2Y3
H2	H0	UST	X0* Y0*	H1H3 X1X2X3 Y1Y2Y3
H3	H0	UST	X0* Y0*	H1H2 X1X2X3 Y1Y2Y3

*في الجدول السابق وفي حال كانت ملفات المحول الثانوية (الفولتية المنخفضة) موصولة على شكل نجمة (**Star Y –**) يجب الإبقاء على حالة نقطة التعادل (**X0**) و/أو (**Y0**) أثناء الفحص مؤرضة كما هي بوضع التشغيل الطبيعي للمحول، أي تأريضها إذا كانت إذا كانت مؤرضة وتركها مفتوحة إذا كانت كذلك.

- **ملفات محول موصولة على شكل نجمة (Star – Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول إليها (غير ظاهرة).**

الشكل (**6-11**) يوضح توصيلة مصدر الفحص بملفات محول موصولة على شكل نجمة (**Star – Y**) ذات نقطة تعادل (**Neutral point**) لا يُمكن الوصول إليها (غير ظاهرة).



الشكل رقم (**6-11**)

الجدول (**6-2**) يبين الأطراف التي يجب حقنها بالفولتية المترددة والأطراف الواجب تأريضها بالإضافة للأطراف الواجب تركها مفتوحة.

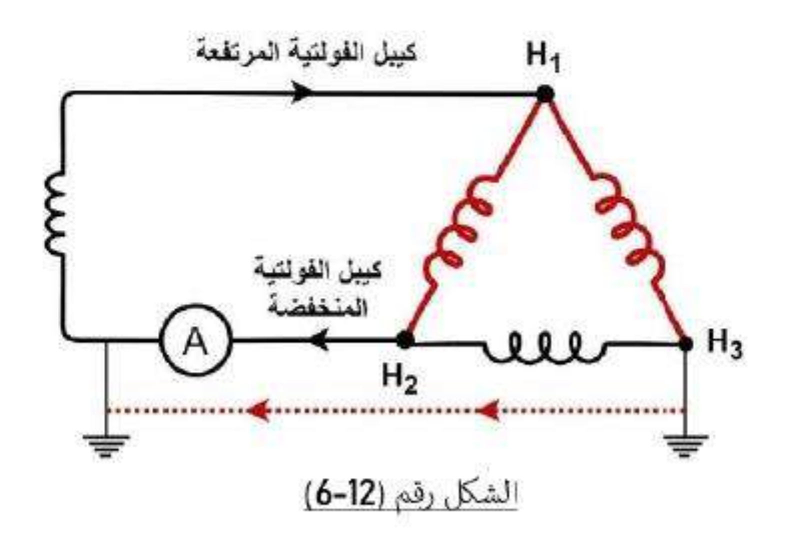
الجدول رقم (**6-2**)

أطراف الحقن	أطراف القياس	أسلوب الفحص	الأطراف المؤرضة	الأطراف المفتوحة
H1	H2	UST	X0* Y0*	H3 X1X2X3 Y1Y2Y3
H2	H3	UST	X0* Y0*	H1 X1X2X3 Y1Y2Y3
H3	H1	UST	X0* Y0*	H2 X1X2X3 Y1Y2Y3

*في الجدول السابق وفي حال كانت ملفات المحول الثانوية (الفولتية المنخفضة) موصولة على شكل نجمة (**Star Y**) يجب الإبقاء على حالة نقطة التعادل (**X0**) و / أو (**Y0**) أثناء الفحص كما هي بوضع التشغيل الطبيعي للمحول، أي تأريضها إذا كانت إذا كانت مؤرضة وتركها مفتوحة إذا كانت كذلك.

- **ملفات محول موصولة على شكل مثلث (Delta – Δ)**

الشكل (**6-12**) يوضح توصيلة مصدر الفحص بملفات محول موصولة على شكل مثلث (**Delta – Δ**).



الشكل رقم (**6-12**)

الجدول (**6-3**) يُبين الأطراف التي يجب حقنها بالفولتية المترددة والأطراف الواجب تأريضها بالإضافة للأطراف الواجب تركها مفتوحة.

الجدول رقم (**6-3**)

أطراف الحقن	أطراف القياس	أسلوب الفحص	الأطراف المؤرضة	الأطراف المفتوحة
H1	H2	UST	H3 X0*, Y0*	X1X2X3 Y1Y2Y3
H2	H3	UST	H1 X0*, Y0*	X1X2X3 Y1Y2Y3
H3	H1	UST	H2 X0*, Y0*	X1X2X3 Y1Y2Y3

*في حال كانت ملفات المحول الثانوية (الفولتية المنخفضة) موصولة على شكل نجمة (**Star Y**) يجب الإبقاء على حالة نقطة التعادل (**X0**) و / أو (**Y0**) أثناء الفحص كما هي بوضع التشغيل الطبيعي للمحول، أي تأريضها إذا كانت إذا كانت مؤرضة وتركها مفتوحة إذا كانت كذلك.

4.2 الفحص بواسطة أجهزة الفحص الحديثة وعادة ما يتم إجراء هذا الفحص بإستخدام أجهزة الفحص نفسها المستخدمة في فحص معامل التبديد/القدرة. الملحق (**6-1**) يوضح خطوات الفحص المُبسطة بإستخدام جهاز الفحص (**Delta 2000**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**).

5. خطوات الفحص

بعد التعرُّف على فلسفة الفحص وطرُق إجراؤه والتوصيلات اللازمة لذلك، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (**Lock-out Tag-out LOTO**).

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أوكما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خِشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمَّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing]** و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير **[ANSI National Electrical Safety Code]** و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية **[OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]**.

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**) وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) وكذلك الحال بنقطة التعادل (**Neutral point**) الخاصة بالملفات التي سيتم تطبيق الفولتية عليها إن وجدت (عادةً ملفات الفولتية المرتفعة)، مع مراعاة ترك نقطة التعادل (**Neutral point**) الخاصة بالملفات ذات الدائرة المفتوحة موصولة بالأرض (عادةً ملفات الفولتية المنخفضة).

5.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (**Trapped Charges**) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قِصَر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص.



تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (**Earthing Dis-connector**) أو المتنقلة (**Portable**) قبل البدأ بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines - OHL**) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.

5.6 في حال سبق إجراء هذا الفحص إجراء أيٍ من الفحوصات التي تعتمد على الفولتية الثابتة (**DC**) مثل فحص مقاومة العازل (**Insulation resistance**) أو فحص مقاومة الملفات (**Winding Resistance**) يجب إزالة المغناطيسية المُتبقة (**De-magnetization**) بالطرق الواردة في نهاية الفحصين سابقي الذكر (الفصل الثاني و الثالث)، وذلك لأن نتيجة هذا الفحص تتأثر بشكل كبير بقيمة المغناطيسية المُتبقية وتشبُّع القلب الحديدي للمحول.

5.7 تحديد وضعيّة مُغيّر الخطوة (**Tap changer**):

يُنصح بإجراء هذا الفحص لأسباب تشخيصية على وضعيّات مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) التالية:

- ✓ على جميع خطوات (**Taps**) مُغيّر الخطوة من النوع (**OLTC**).
- ✓ خطوة المنتصف أو خطوة التعادل بالإضافة إلى خطوة لأعلى وخطوة لأسفل عن نقطة التعادل لمُغيّر الخطوة من النوع (**OLTC**) هذا كما ورد في المِعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.152-2013]**.
- ✓ الخطوة التشغيلية الإعتيادية أي التي كان عليها المحول أثناء عمله الطبيعي في حال كان مُغيّر الخطوة من النوع (**DETC or OCTC**).

ففي حال أردنا تحليل نتائج هذا الفحص عن طريق ملاحظة التباين بين الأطوار أي مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار الثلاثة (**Phase Pattern**) كما سيتم شرحه لاحقاً في فقرة تحليل نتائج الفحص، فإنه يتم الإكتفاء بإجراء هذا الفحص عند خطوة مُحددة من خطوات مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) وعادةً ما تكون الخطوة المرجعيّة أو التشغيلية، أما في حال أردنا تحليل نتائج الفحص عبر ملاحظة نمط التباين بين الخطوات المختلفة لمُغيّر الخطوة (**Tap changer Pattern**) فإنه يُنصح بإجراء هذا الفحص على جميع الخطوات (**Tap**).

5.8 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص كما هو مبين في الشكل (**6-10**) للملفات الموصولة على شكل مثلث نجمة (**Star – Y**) بنقطة تعادل ظاهرة ويُمكن الوصول إليها، أو الشكل (**6-11**) للملفات الموصولة على شكل نجمة (**Star Y**) بنقطة تعادل غير ظاهرة ولا يُمكن الوصول إليها، أو الشكل (**6-12**) للملفات الموصولة على شكل (**Delta – Δ**).

5.9 تحديد فولتية الفحص:

يجب إجراء هذا الفحص عند مستوى فولتيات مرتفع بحيث لا يتعدى قيمة الفولتية الإسمية (**L-L**) لملفات المحول الموصولة على شكل مثلث (**Delta – Δ**)، وأن لا يتعدى قيمة الفولتية الإسمية (**L-N**) لملفات المحول الموصولة على شكل نجمة (**Star – Y**)، حيث أن النسخة المَصنعيّة من هذا الفحص عادة ما يتم إجراؤها عند مستوى فولتية مقداره (**100%**) بالمئة أو (**110%**) بالمئة من الفولتية الإسمية، ونظراً لصعوبة الحصول على فولتية فحص مرتفعة في الموقع عادة ما يتم الإكتفاء بإجراء هذا الفحص على فولتيات متدنية قرابة الـ(**10kV**) كيلوفولت أو أقل (**2.5kV**) كيلوفولت أو كما يتيح جهاز الفحص، ومن ثم يتم تصحيحها داخلياً في جهاز الفحص إلى الفولتية المُرادة.



ملحوظة (6-1): في حال ظهور تيار تهييج مرتفع يفوق قدرة الخرج لجهاز الفحص فإن أجهزة الفحص الحديثة سوف توقف الفحص تلقائياً، عندها يُمكن تقليل فولتية الفحص وإعادة الفحص مرة أُخرى. وعادة ما يظهر تيار التهييج المرتفع عند فحص محولات التوزيع قليلة السعة أو في حال وجود أعطال قِصر بين اللفات أو في حال كان نوع مُغيّر الخطوة (**Reactive OLTC**) عند لحظة الـ(**Bridging**) كما سيتم شرحه لاحقاً.

5.10 البدء بالفحص وفقاً للخطوات المبينة في الملحق (**6-1**) الخاص بجهاز الفحص (**DELTA2000**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**).

6. تصحيح القيمة المُقاسة

تعتمد قيمة تيار التهييج على قيمة فولتية الفحص لذلك عند مقارنة هذا الفحص بفحوصات سابقة لنفس المحول يجب التأكد من أنها تم إجراؤها عند نفس مستوى الفولتية، ولكن في حال إختلاف قيمة فولتية الفحص بين الفحوصات السابقة والحالية فإنه يصعب مقارنتها بشكل صحيح، ومما يزيد الأمر صعوبة أن تيار التهييج لا يرتبط بشكل خطي مع مقدار فولتية الفحص لذلك يصعب تصحيحها حسابياً.

تقوم أجهزة الفحص الحديثة بتصحيح القيمة المُقاسة تلقائياً عند أي فولتية فحص إلى الفولتية (**10kV**) كيلوفولت داخلياً ليتسنى تحليلها ومقارنتها بسهولة ويُسر.

7. تحليل نتائج الفحص

يُعد فحص تيار التهييج (**Excitation current**) من الفحوصات التي لا تعتمد على وجود قِيَم مرجعيّة (**Reference value**) أو نتائج فحوصات سابقة ليتم المقارنة بها بشكل رئيسي، ولتحليل نتائج هذا الفحص لا بُد من معرفة الأنماط الشائعة للقِيَم الناتجة عن هذا الفحص والتي تنقسم لنوعين رئيسيين؛ الأول عند مقارنة نتيجة الفحص آحادي الطور بين الأطوار وهو ما يُسمى بنمط الطور (**Phase Pattern**)، والثاني تبعاً لنوع مُغيّر الخطوة وهو ما يُسمى بنمط مُغير الخطوة (**Tap changer Pattern**)، بحيث يتم تطبيق هذه الانماط على تيارات التهييج بالإضافة إلى خسائر القدرة أيضاً (**Watt loss**):

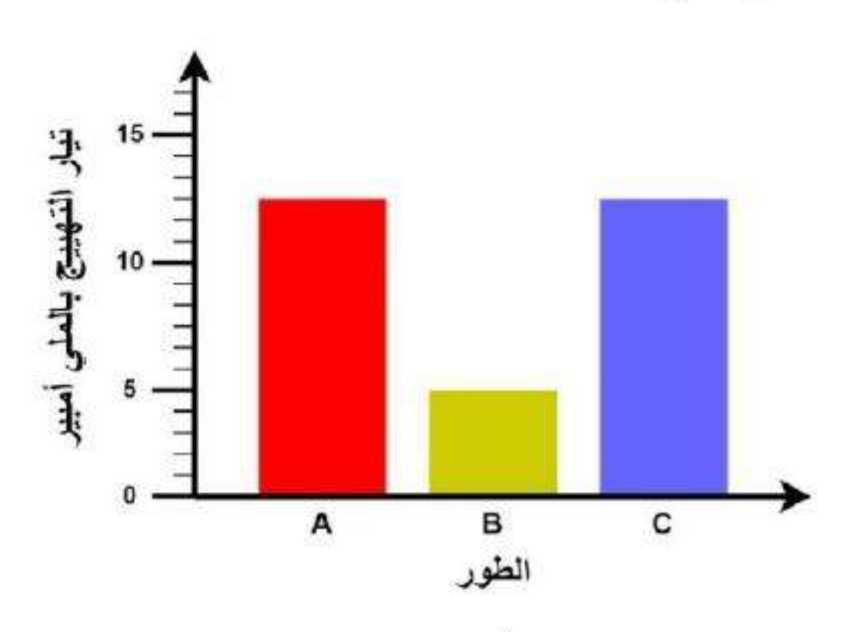
7.1 المقارنة بين الأطوار المختلفة مع ثبات فولتية الفحص وخطوة مُغيّر الخطوة (Tap changer) وهذا ما يُسمى بنمط الطور (Phase Pattern).

عند إجراء هذا الفحص على أطوار المحول المُختلفة كلاً على حدا، تظهر مجموعة من أنماط القراءات لتيار التهييج والتي من خلالها يتم تحليل نتائج هذا الفحص وتُسمى هذه الأنماط بأنماط الطور (**Phase Patterns**)، وتتأثر هذه الأنماط بشكل كبير بالمحاثة المغناطيسية للقلب الحديدي وممانعته المغناطيسية (**Reluctance**) لمرور الفيض المغناطيسي والتي تعتمد بشكل رئيسي على تركيب القلب الحديدي. وتنحصر هذه الأنماط بالأنماط الخمسة الآتية:

- **النمط الأول: مرتفع - منخفض - مرتفع (H – L - H)**

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهييج للملفات الموجودة على أطراف القلب الحديدي متساوية وأكبر من قيمة تيار التهييج لملفات الطور الأوسط لذلك يُرمز لهذا النمط (**H-L-H**) كما هو مُبين بالشكل (**6-13**)، و بالرجوع إلى النشرة التقنية الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة **[CIGRE, Guide for Transformer Maintenance 445]** فإنه عادةً ما تكون قيمة التباين في التيار للطورين المُفترض أن تكون قيمتهما متقاربة قرابة الـ(**5%**) بالمئة و يكون مقدار تيار التهييج للطور الأوسط أقل منهما قرابة الـ(**30%**) بالمئة. أما الكتاب **[Jill C. Duplessis, Electrical Field Tests for the Life Management of Transformers]** فقد أورد قيمة تباين لقيمة تيار التهييج بين الطورين المفترض أن قيمتها متقاربة قرابة الـ(**10%**) بالمئة في حال كانت قيمة تيار التهييج لا تزيد عن أو تساوي (**50mA**) ملي

أمبير وما مقداره (5%) في حال كانت قيمة تيار التهييج تزيد عن (50mA) ملي أمبير. وأي قيمة تباين أكبر من تلك المذكورة أعلاه فإنها تدعو للبحث المُعمّق وراء إختلاف قيمة هذه التيارات والتي قد تقود لإكتشاف الأعطال داخل المحول.

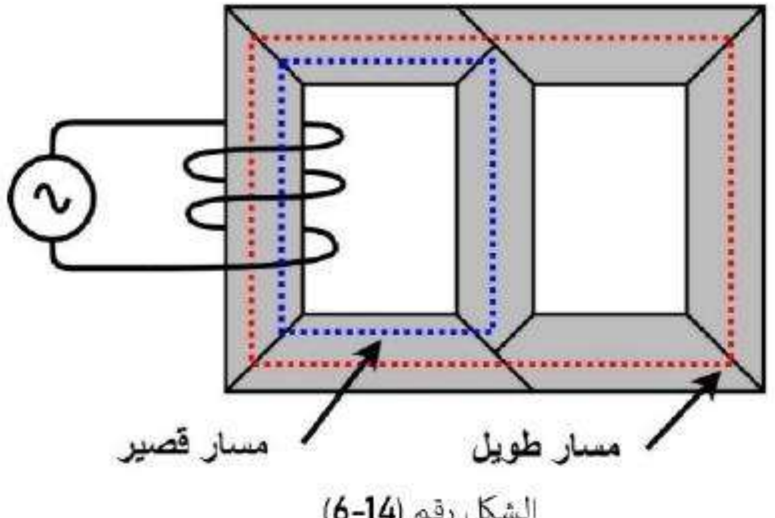


الشكل رقم (6-13)

ويُتوقّع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهييج عند فحص المحولات في الحالات التالية:

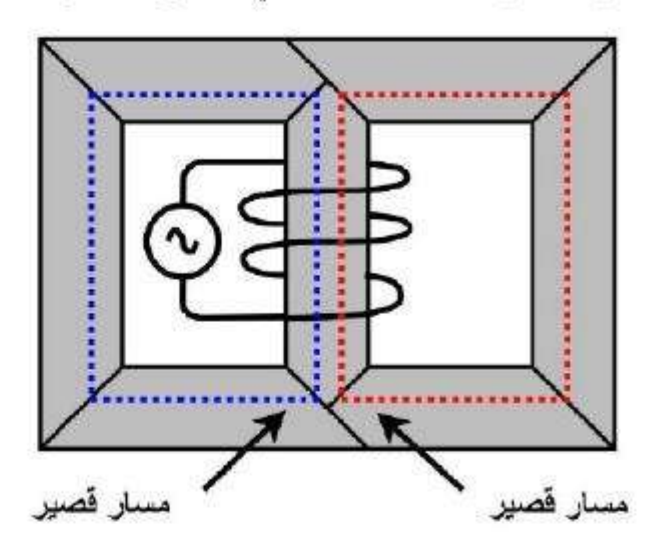
- ✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ) كما هو مبين بالشكل (6-12).
- ✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) يُمكن الوصول لها (ظاهرة) كما هو مبين بالشكل (6-10).
- ✓ محول ذو القلب حديدي خماسي الأعمدة (Shell type) ملفاته موصولة على شكل مثلث (Delta - Δ).

ويعود سبب الحصول على هذا النمط من القراءات (H-L-H)، إلى أن مقدار تيار التهييج كما ذُكر سابقاً يتناسب طردياً مع مُمانعة القلب الحديدي (Reluctance - ξ) والتي تعتمد بدورها على تركيب القلب الحديدي كطول الفك (Yoke) والعامود (Limb) كما هو مُبين بالمعادلة (6.10) والشكل (6-8). لذلك فإنه عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات الأطوار المُثبتة على عامود (Limb) القلب الحديدي الخارجي أي عادة الطور (A) أو (C)، ينشأ مسارين للفيض المغناطيسي المُتكوّن في القلب الحديدي بحيث يكون أحدهما قصير والآخر طويل كما هو مُبين بالشكل (6-14).



الشكل رقم (**6-14**)

أما عند تطبيق فولتية مترددة على ملفات الطور المُثبّت على عامود (**Limb**) القلب الحديدي الأوسط أي عادة الطور (**B**)، ينشأ مسارين قصيرين للفيض المغناطيسي المُتكوّن كما هو مُبين بالشكل (**6-15**).

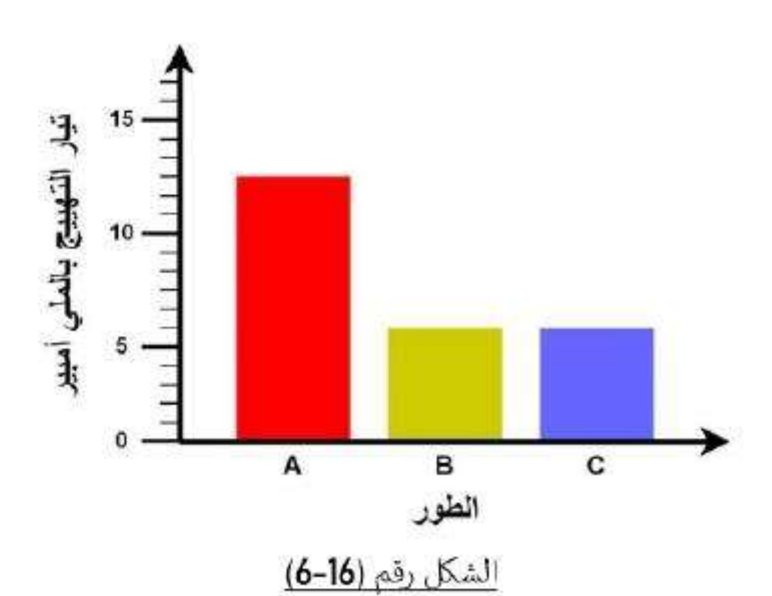


الشكل رقم (**6-15**)

وبمقارنة الشكل (**6-14**) بالشكل (**6-15**) فإنه يُمكن ملاحظة أن طول المسار (*l*) الذي سيسلكه الفيض المغناطيسي في حال تطبيق الفولتية على الملفات التي على الأطراف أكبر من طول المسار الذي سيسلكه عند تطبيق الفولتية على الطور الأوسط مما يُفسر إزدياد مُمانعة القلب (**Reluctance**) لمرور الفيض المغناطيسي ويؤدي لزيادة قيمة تيار التهييج المُتكوّن في الملفات على الأطراف، والعكس بالعكس عند تطبيق الفولتية على الملف الأوسط.

- **النمط الثاني: مرتفع - منخفض - منخفض (H – L - L)**

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهييج متساوية لطورين من أطوار المحول والطور الثالث تكون قيمته أكبر منهما لذلك يُرمز لهذا النمط (**H-L-L**) كما هو مُبين بالشكل (**6-16**)، حيث يُسمح بنسبة تباين بين قِيَم تيارات الطورين المتساويين بالقيمة (**L- L**) قرابة الـ(**10%**) وأي قيمة تباين أكبر من ذالك تدعو للبحث المُعمّق وراء إختلاف قيمة هذه التيارات والتي قد تقود لإكتشاف الأعطال داخل المحول.



الشكل رقم (6-16)

ويُتوقّع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهييج عند فحص محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل نجمة (Star – Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول إليها – أي أنه موصول على شكل نجمة داخلياً وتكون نقطة التعادل غير ظاهرة- كما هو مبين بالشكل (6-11).

ويعود سبب الحصول على هذا النمط من القراءات (H-L-L)، إلى عدم إمكانية إجراء القياسات بشكل آحادي الطور (Single phase measurements) ولا بد من تطبيق الفولتية على طورين موصولين على التوالي كما هو مبين بالشكل (6-11)، فكما تم شرحه في النمط السابق (H-L-H) أن الطور الأوسط (B) يكون ذو قيمة تيار تهييج أقل لذلك في حال وصله على التوالي مع أحد الطورين الآخرين (A – B) و (B – C) فإنه سيؤدي لإنخفاض قيمة تيار التهييج الكُليّة عن قيمة تيار التهييج عند القياس على الطورين (A- C) وهذا بدوره يُفسر ظهور هذا النمط من قراءات تيار التهييج (H-L-L).

والجدول (6-4) يُبين ظهور هذا النمط عند فحص محول ذو مجموعة توصيل (Yd1).

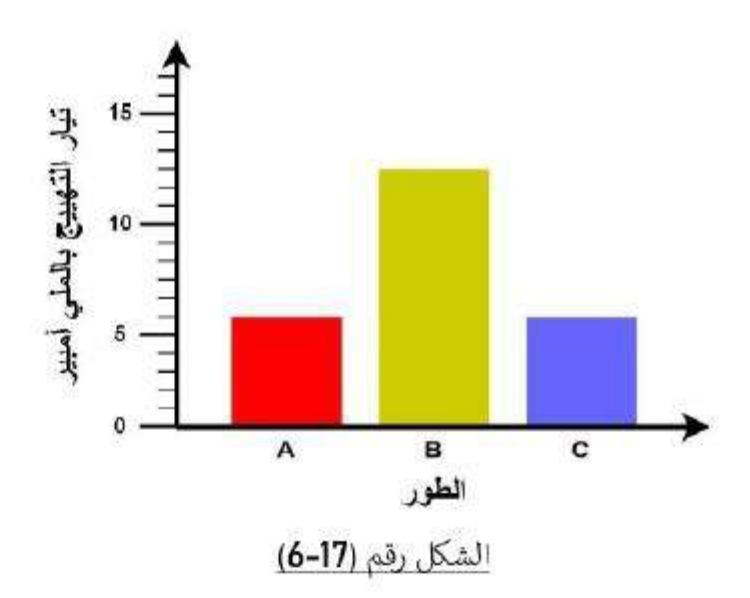
الجدول رقم (6-4)

الطور المُقاس	توصيلة الفحص	التيار المُتوقع حسب الطور	التيار الكُلّي المُتوقع
A و B	H1 – H3	مرتفع + مرتفع	مرتفع
B و A	H2 – H1	منخفض + مرتفع	منخفض
C و B	H3 – H2	مرتفع + منخفض	منخفض

- **النمط الثالث: منخفض – مرتفع - منخفض (L – H – L)**

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهييج للملفات الموجودة على أطراف القلب الحديدي تقريباً متساوية وأقل من قيمة تيار التهييج لملفات الطور الأوسط لذلك يُرمز لهذا النمط (L-H-L) كما هو مُبين بالشكل (6-17). كما ويُعدّ هذا النمط أقل شيوعاً على النقيض من الأنماط سابقة الذِكر، إذ أنه من غير المتوقع الحصول على هذا النمط عند فحص محول قدرة (Power Transformer) ولكن يُمكن الحصول عليه

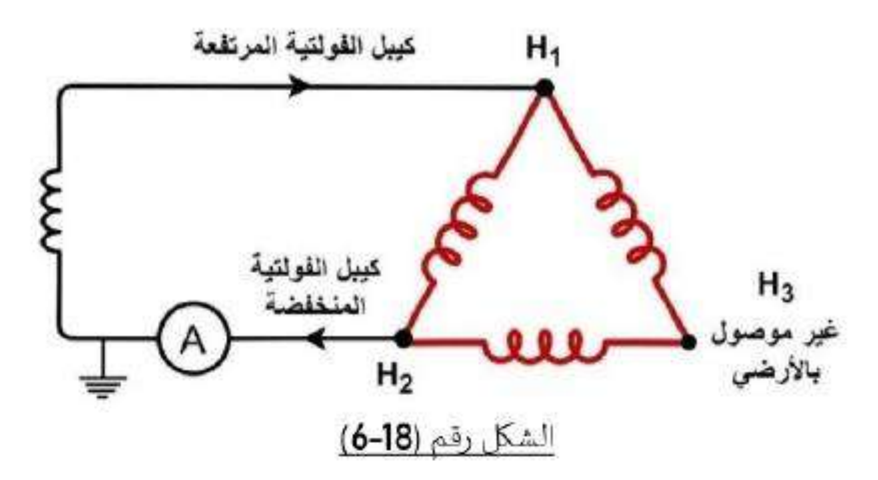
عند فحص محول توزيع (Distribution Transformer) ذو سِعة (Capacity) مُتدنية أقل من (3MVA) ميجافولت أمبير.



الشكل رقم (6-17)

ويُتوقّع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهييج عند فحص محولات التوزيع كما ذُكر سابقاً بالإضافة للحالات التالية:

- ✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل مثلث (Delta Δ -)، ولخطب ما لم يتم توصيل الطرف الثالث مع الأرضي عند إجراء الفحص كما هو مُبين بالشكل (6-18). (خطأ في توصيلة الفحص)



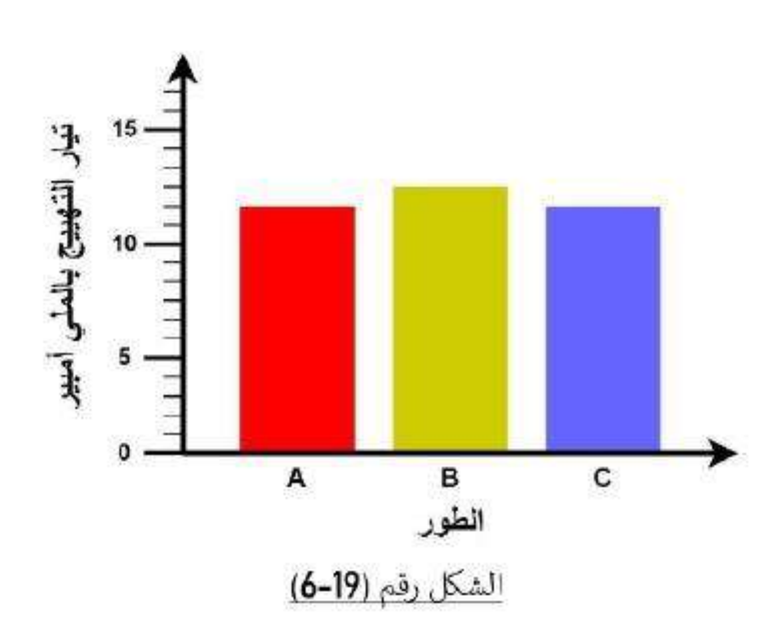
الشكل رقم (6-18)

- ✓ محول ذو قلب حديدي ثلاثي الأعمدة (Core type) ملفاته موصولة على شكل نجمة (Star - Y) ذات نقطة تعادل (Neutral point) لا يُمكن الوصول لها (غير ظاهرة). حيث أنه في هذه الحالة لم يَعُد الفحص آحادي الطور (Single phase) بل أصبح ثنائي الطور وذلك لأن أطراف الفحص في هذه الحالة (H1 – H2) و (H1 – H3) و (H2 – H3) مما يَعني تطبيق الفولتية على طورين بنفس الوقت كما هو مبين بالشكل (6-11) كما تم شرحه في النمط السابق.
- ✓ محول ذو قلب حديدي رباعي الأعمدة كبعض المحولات التلقائية (Autotransformers) المُصنّعة بالولايات المتحدة الأمريكية.

لذلك عند الحصول على هذا النمط عند فحص محول قدرة (**Power transformer**)، فإنه بالغالب يدُل على وجود عطل داخلي بالمحول، أما في حال فحص محول توزيع (**Distribution transformer**) فمن المُرجح الحصول على هكذا نمط وليس بالضرورة أن يكون دليل على وجود عطل داخلي في المحول.

- **النمط الرابع: مرتفع – مرتفع - مرتفع (H – H – H)**

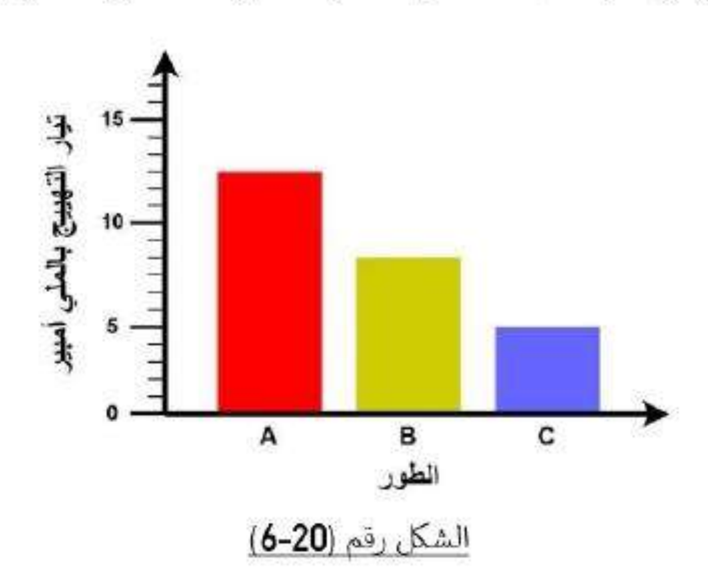
في هذه النمط تكون قراءات تيار التهييج متساوية لجميع الأطوار لذلك يُرمز لهذا النمط (**H-H-H**) كما هو مُبين بالشكل (**6-19**)، ويُتوقّع أن يظهر هذا النمط من قراءات تيار التهييج عند فحص المحولات ذات القلب الحديدي خماسي الأعمدة (**Shell type**) ذو ملفات ثانوي موصولة بغير توصيلة المثلث (**Delta Δ –**).



الشكل رقم (**6-19**)

- **النمط الخامس: مرتفع – متوسط - منخفض (H – M – L)**

في هذه النمط تكون قراءات تيار التهييج غير متساوية لجميع الأطوار لذلك يُرمز لهذا النمط (**H-M-L**)، وأيضاً يُسمى هذا النوع من القراءات باللانمط وذلك لأنها لا تتبع نمط مُعين كما هو مُبين بالشكل (**6-20**).



الشكل رقم (**6-20**)

لذلك وعند ظهور القراءات بهذا الشكل غير المتساوي بين الأطوار فإنه دليل على واحدة من الأمور التالية:

- **غالبية تيار التهييج ليست حثية.**

يتكون تيار التهييج من ثلاث مُركّبات رئيسية وهي المُركّبة الحثية والمادية والسعويّة، وعادةً ما تُهيمن المُركّبة الحثية للتيار على قيمة التيار الكُلّي وهذا هو الوضع الطبيعي. ولكن في حال إزدياد مرُكّبة التيار السعويّة بحيث تُهيمن على قيمة التيار الكُليّة فإن هذا من شأنه التأثير على نتائج الفحص وإعطاء قِيَم تيار غير متساوية.

- **ويبقى التساؤول المطروح كيف يُمكن الكشف عن هذه الحالة؟ وكيفية التعامل معها؟**

فيما يَخُص الشِقّ الأول من السؤال فإن بعض أجهزة الفحص الحديثة خاصة المُصنّعة بواسطة شركة (**OMICRON**) تُعطي قيمة تيار التهييج بالإضافة لزاوية الطور (**Phase angle**) لهذا التيار، ومنها يُمكن معرفة فيما إذا كان التيار الحِثي هو المُسيّطر بحيث تكون الزاوية سالبة، أما إذا كان التيار السعوي هو المُسيّطر فإن الزاوية ستكون موجبة.

أما فيما يخُص الشِقّ الثاني من السؤال فإنه في حال الحصول على نتائج فحص تهييج غير متساوية وعبر قيمة زاوية الطور (**Phase angle**) ثبت أن المُركّبة السعوية من التيار هي المُسيّطرة، فإنه يتم اللجوء لتتبع نمط خسائر القدرة (**Watt loss**) والتي تعتمد في قيمتها على قيمة مركبة التيار المادية (**Resistive**). وفي حال كانت قيمة خسائر القدرة جيدة يُمكن قبول الفحص وجعل قيمته مرجعيّة للمرات القادمة، أما في حال فشل مقارنة خسائر القدرة أيضاً فإنه يجب البحث أكثر في أسباب عدم تساوي تيارات التهييج والتي قد تقودنا إلى وجود أعطال في المحول.

- **مغناطيسية مُتبقية في القلب الحديدي**

في حال وجود مغناطيسية مُتبقية في القلب الحديدي والتي قد تكون ناتجة عن إجراء بعض الفحوصات ذات الفولتية الثابتة (**DC voltage**) مثل فحص مقاومة العزل (**Insulation Resistance**) وفحص مقاومة الملفات (**Winding resistance**) فإنه من المحتمل الحصول على هذا النوع من القراءات غير المتساوية لتيار التهييج، لذلك يُنصح بإجراء هذا الفحص قبل الفحوصات سابقة الذِكر وفي حال إجراء هذا الفحص بعدها يجب عمل إزالة لهذه المغناطيسية المُتبقية بالطرق الواردة في نهاية الفصل الثاني والثالث من هذا الكتاب ومن ثم إعادة هذا الفحص مرة أُخرى.

- **وجود عطل في المحول**

وجود الأعطال من شأنه إعطاء قراءات تيار تهييج غير متساوية والتي تكون عادةً على شكل زيادة في قيمة تيار التهييج على طور واحد أو أكثر، وفي هذه الحالة يجب مقارنة نتيجة الفحص الحالية بنتائج سابقة لنفس المحول مع مراعاة ثبات قيمة فولتية الفحص للفحصين السابق والحالي حتى يتسنى لنا إجراء مقارنة بين نتائج هذه الفحوصات بشكل صحيح. كما ويُنصح بإجراء هذا الفحص على جميع خطوات مُغيّر الخطوة ومقارنتها بين الخطوات وبنتائج الفحوصات السابقة إن أمكن مع مراعاة ثبات فولتية الفحص كما ذُكر سابقاً، بالإضافة إلى أن إختلاف مستوى المغناطيسية المُتبقية في القلب

الحديدي بين الفحص السابق والحالي قد يؤدي لإختلاف في قيمة الفحص بشكل طفيف قد لا يؤثر على نتيجة الفحص بحيث يُمكن إهماله.



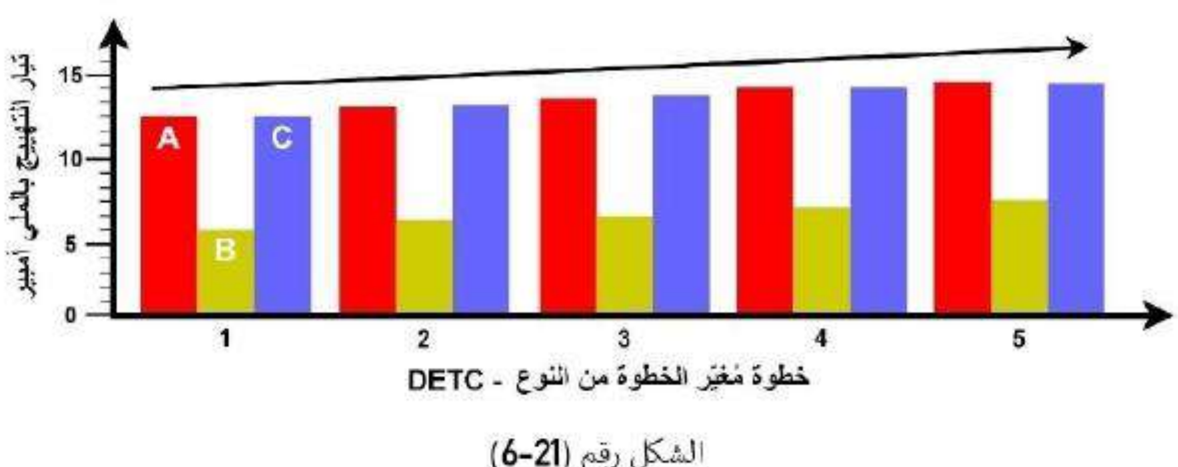
ملحوظة (2-6): فيما يَخُص المحولات آحادية الطور (**Single Phase**) فإنه يتم تحليل نتيجة هذا الفحص بمقارنتها بنتائج فحص سابقة لنفس المحول أو مقارنتها بنتائج فحص محول مشابه في مواصفاته وبيئته التشغيلية.

7.2 المقارنة بين نتائج الفحص عند خطوات مُغيّر الخطوة المختلفة مع ثبات فولتية الفحص وهذا ما يُسمى بنمط مُغيّر الخطوة (Tap Changer Pattern).

عند إجراء هذا الفحص عند خطوات مُغيّر الخطوة المُختلفة تظهر مجموعة من أنماط القراءات لتيار التهييج والتي من خلالها يتم تحليل نتائج هذا الفحص، وتُعدّ الأنماط التالية الأكثر شيوعاً:

- **النمط الأول: مُغيّر خطوة من النوع (De-Energized Tap Changer - DETC or OCTC)**

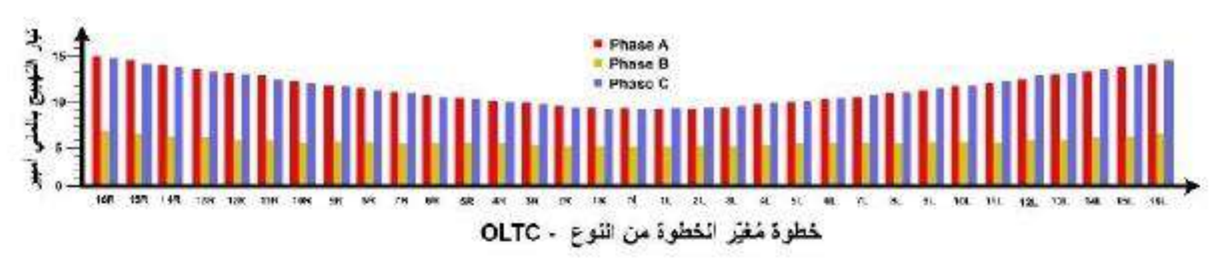
يظهر هذا النمط من القراءات عند فحص محول ذو مُغيّر خطوة من النوع (**DETC** أو **OCTC**)، حيث أن القراءات تزداد أو تتناقص بشكل خطي وفقاً لتغيير وضعية مُغيّر الخطوة صعوداً أو نزولاً كما هو مبين بالشكل (**6-21**) التالي:



الشكل رقم (**6-21**)

- **النمط الثاني: مُغيّر خطوة من النوع (On-load Tap changer OLTC) يحتوي مقاومة (Resistive)**

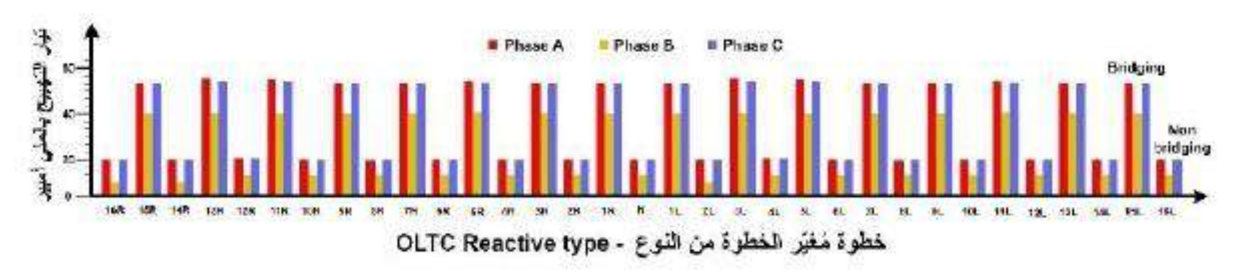
يظهر هذا النمط من القراءات عند فحص محول ذو مُغيّر خطوة من النوع (**OLTC**) يحتوي على مقاومة مادية (**Resistive**) للحد من التيارات الدوّارة (**Circulating current**) التي تنتج من عملية تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**OLTC**) كما يظهر بالشكل (**6-22**).



الشكل رقم (6-22)

- النمط الثاني: مُغيّر خطوة من النوع (On-load Tap changer OLTC) يحتوي محاثة (Reactive)

يظهر هذا النمط من القراءات عند فحص محول ذو مُغيّر خطوة من النوع (**OLTC**) يحتوي على محاثة (**Reactive**) أو ما يُسمى بالـ(**Preventative Transformer - PA**) للحد من التيارات الدوّارة (**Circulating current**) التي تنتج من عملية تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**OLTC**). وعند التبديل بين الخطوات يوجد وضعيتان؛ الأولى وتُسمى (**Non-Bridging**) والوضعية الثانية تُسمى (**Bridging**) وهنا يُفسر ظهور هذا النمط من القراءات المُبين في الشكل (**6-23**).



الشكل رقم (6-23)

8. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل، ومن هذه العوامل:

8.1 التمغنط الزائد للقلب الحديدي – Core Excessive Magnetizing

إن التمغنط الزائد للقلب الحديدي أو كما يُسمى بالمغناطيسية المُتبقية بالقلب الحديدي من شأنها التأثير على قيمة هذا الفحص، لذلك عند ظهور تيارات تهييج بقيم مختلفة عن بعضها البعض بين الأطوار وبنسبة تباين عالية يجب التأكد من عدم وجود مغنطة زائدة للقلب الحديدي قبل إرجاء السبب إلى وجود عطل في المحول.

وقد تكون هذه المغناطيسية المتبقية ناتجة عن إجراء بعض الفحوصات ذات الفولتية الثابتة (**DC voltage**) مثل فحص مقاومة العزل (**Insulation Resistance**) وفحص مقاومة الملفات (**Winding resistance**) أحد أسباب الحصول على قراءات غير متساوية لتيار التهييج، لذلك يُنصح بإجراء هذا الفحص قبل الفحوصات سابقة الذكر وفي حال إجراء هذا الفحص بعدها يجب عمل إزالة لهذه

المغناطيسية المُتبقية بالطرق الواردة في نهاية الفصل الثاني والثالث من هذا الكتاب ومن ثم إعادة هذا الفحص مرة أُخرى.



ملحوظة (6-3): لا يُمكن جعل قيمة مغنطة القلب الحديدي للمحول مساوية للصفر، لذلك فإن مغنطة القلب الحديدي بدرجات قليلة لا تؤثر على قيمة هذا الفحص ولكن إذا كانت المغنطة بدرجات زائدة فإنها سوف تؤثر بالتأكيد.



ملحوظة (6-4): لسوء الحظ من الصعب قياس قيمة المغناطيسية المُتبقية في القلب الحديدي للمحول، لذلك بعد الحصول على قِيَم تيارات تهييج غير متساوية وكان هنالك شك من وجود مغناطيسية متبقية، فإن الطريقة الوحيدة للتأكد من ذلك هو بعمل إزالة للمغناطيسية المُتبقية (**De-magnetization**) ومن ثم إعادة الفحص مع ضرورة التنويه إلى أن بعض المحولات تحتاج لعمل إزالة مغناطيسية متبقية (**De-magnetization**) أكثر من مرة للوصول إلى قيمة مغنطة متدنية للقلب الحديدي.

8.2 تصحيح قيمة الفحص للفولتية المناسبة

إن قيمة تيار التهييج المُقاسة تعتمد على قيمة فولتية الفحص ولكنها لا ترتبط بشكل خطي مع مقدار هذه الفولتية، لذلك يصعب تصحيحها حسابياً كإستخدام الإستيفاء الخطي مثلاً (**Linear interpolation**) وذلك لأن المُركبة المسيطرة على قيمة تيار التهييج هي مركبة حثية وكما هو معلوم أن التيار الحثي لا يرتبط خطياً بقيمة الفولتية على النقيض من التيار السَعوي ذو الإرتباط الخطي بفولتية الفحص، وهذا بدوره يزيد صعوبة مقارنة القيمة المُقاسة عند تطبيق فولتية فحص (**2.5kV**) كيلوفولت مع قيمة سابقة تم قياسها بتطبيق فولتية فحص مقدارها (**10kV**) كيلوفولت. لذلك ولتجنب الخوض في حيثيات التصحيح يُنصح بعمل هذا الفحص عند نفس الفولتية التي تم عمل الفحص السابق عندها وعادةً ما تكون (**2.5 kV**) أو (**10kV**) كيلو فولت كما وتتيح بعض أجهزة الفحص الحديثة التصحيح التلقائي لقيمة تيار التهييج للفولتية المرجعية (**2.5KV**) أو (**10KV**) كيلوفولت.

8.3 سيطرة مركبة التيار السعوية على تيار التهييج

يتكون تيار التهييج من ثلاث مركبات رئيسية وهي المُركّبة الحثية (**Inductive**) والمُركّبة المادية (**Resistive**) والمُركّبة السَعويّة للتيار (**Capacitive**)، وعادة ما تُهيمن المُركّبة الحثية للتيار على قيمة التيار الكُلي وهذا هو الوضع الطبيعي. ولكن في حال إزدياد مُركّبة التيار السعويّة بحيث تهيمن على قيمة التيار الكليّة فإن هذا من شأنه التأثير على نتائج الفحص و إعطاء قِيَم تيار غير متساوية.

مركبة التيار السَعوي تُعبّر عن التيار اللازم لبناء المجال المغناطيسي في المادة العازلة للمحول وعادةً ما تكون قيمتها مهملة مقارنة بمركبة التيار الحثية والمادية الناتجة عن مغنطة وضياعات القلب الحديدي، ومع تقدم العلم والصناعات وظهور المواد المُكوّنة للقلب الحديدي ذات الضياعات المنخفضة كمادة الـ(**Amorphous**)، وهذا بدوره أدى لتقليل من قيمة مُركّبة تيار التهييج الحِثية والمادية وساهم في جعل مُركّبة التيار السَعوية ذات قيمة لا يُمكن إهمالها مقارنة بالمُركّبتين السابقتين لتيار التهييج. وبناءاً على ما

سبق ونتيجة لهيمنة المُركّبة السَعوية للتيار على تيار التهييج فإن الطُرق التقليدية لتحليل نتائج هذا الفحص قد لا تكون مُجدية، لذلك يتم اللجوء لتتبع نمط خسائر القدرة (**Watt loss**) عوضاً عن تتبع نمط تيار التهييج، حيث أن هذه الخسائر تعتمد قيمتها على قيمة مُركّبة التيار المادية (**Resistive**). وفي حال كانت قيمة خسائر القدرة جيّدة يُمكن قبول الفحص وجعل قيمته مرجعيّة للمرات القادمة أما في حال فشل مقارنة خسائر القدرة أيضاً، فإنه يجب البحث أكثر في أسباب عدم تساوي تيارات التهييج والتي قد تقودنا إلى وجود أعطال في المحول.

8.4 أخطاء في تطبيق خطوات الفحص

إن الأخطاء في تطبيق خطوات الفحص مثل عدم تأريض الطرف الثالث عند فحص محول ثلاثي الأعمدة (**Core type**) ملفاته موصولة على شكل مثلث (**Delta – Δ**) كما هو مبين في الشكل (**6-18**) سيؤدي إلى التأثير على نتائج الفحص و تغيُّر نمط القراءات الظاهرة كما ذُكر أنفاً.

9. فحوصات إضافية داعِمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أُخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص و تحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول و الذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص تيار التهييج وكانت نتائج الفحص غير مُرضية بعد تحليلها وفقاً للأنماط السابقة، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تجنُّب الأمور التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفي حال الحصول على نتيجة أخرى غير مُرضية لا يُنصح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأُخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها كالآتي:

- فحص نسبة عدد لفات المحول (**TTR**) وذلك للكشف عن مشكلة الـ(**Turn to turn SC**).
- فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي (**SFRA**) وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي للمحول.
- فحص مقاومة ملفات المحول (**WRM**) وذلك للكشف عن وجود قطع (**Open circuit**) في موصلات الملفات الخاصة بالمحول.
- فحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage reactance**) للكشف عن تشوّه الملفات إن وجد.
- فحص المقاومة الديناميكي (**Dynamic WRM**) للكشف عن أعطال مُغيّر الخطوة (**OLTC**).
- فحص الغازات الذائبة في الزيت (**DGA**) أيضاً للكشف عن وجود أعطال في مُغيّر الخطوة (**OLTC**).

10. أمثلة على نتائج فحوصات مَصنعيّة

10.1 المثال الأول: الشكل (**6-24**) يُبين قِيَم فحص تيار التهييج (**Excitation current**) مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three Phase Two Winding**) موصول بطريقة (**Dyn1**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**OLTC**).

Acceptance
Test Certificates

AREVA

Customer :		A.C. INSULATION TESTS AND EXCITING CURRENTS		Page No :	
				Serial No.:	
		Standard :	IEC 60076-1§10.1.3b) & i)	Report No.:	
Rated Power(MVA):	24 / 30	Rated Voltage(kV):	15 / 6,6	Vector Group:	Dyn1
Object temperature :	26 °C	Relative humidity :	40 %	Ambient temperature :	23,0 °C
Weather :	Closed Place	Rated Frequency :	50 Hz	Test Frequency:	50 Hz

EXCITING CURRENT MEASUREMENT

Tap Pos	Measurement	Energized	UST	Grounded	Floated	Test voltage (KV)	Reading	Reading	Multiplier	mA
1	I_{H1H2}	H1	H2	X0	H3, LV	3	49,0	49,0	10	490
	I_{H2H3}	H2	H3	X0	H1, LV	3	67,0	67,0	10	670
	I_{H3H1}	H3	H1	X0	H2, LV	3	65,4	65,4	10	654

Mesuring device : M2H DOBLE Serial

HV, LV, C_{HL}, C_H, C_L

<u>الشكل رقم (**6-24**)</u>

10.2 المثال الثاني: الشكل (**6-25**) يُبين قِيَم فحص تيار التهييج (**Excitation current**) مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات (**Three Phase Tertiary Winding**) موصول بطريقة (**YNd11-d11**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**OLTC**).

Measurement of the no-load loss and current

The no-load loss and current shall be measured on low voltage winding terminals at rated frequency and a voltage corresponding to excitation voltage. The remaining winding or windings shall be left open-circuited. Measurement of the no-load current and loss, all the neutral points, core, frame, tank enclosure are earthed firmly during the test.

Measured data

Excitation rate	Test voltage (kV)		No-load current		No-load loss (kW)	
	Mean value	Rms	Io (A)	Io(%)	Pm	Po
90% Ur	10.35	10.36	4.198	0.11	43.10	43.02
100% Ur	11.50	11.55	4.341	0.11	55.74	55.49
110% Ur	11.65	13.11	17.244	0.44	89.58	86.39
Required values of the voltage 100%Ur			Po(kW)	<59		
			Io(%)	<0.30		
Tested results	Measured values meet the relevant requirements					

<u>الشكل رقم (**6-25**)</u>

الملحق (6-1)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط ، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص تيار التهييج بإستخدام جهاز DELTA2000 10kV by MEGGER





الشكل رقم (6-1-1)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(**DELTA2000 manual**)
  - فولتية المدخل الإسمية : **230 V, 50 Hz**
  - نطاق فولتية المخرج : **0** إلى **12kV**

- نطاق القياسات : حسب الجدول التالي.

الجدول رقم (6-1-1)

القيمة المُقاسة	النطاق (Range)	درجة الوضوح (Resolution)	الدقة (Accuracy)
الفولتية	250 V – 12 kV	10 V	±(1% of reading + 1 digit)
التيار	0 – 5 A	1 µA	±(1% of reading + 1 digit)
المواسعة	1 pF – 1.1 µF	0.01 pF	±(0.5% of reading + 2 pF) UST ±(0.5% of reading + 6 pF) GST
معامل التبديد	0 – 200%	0.01%	±(2% of reading + 0.05% DF)
معامل القدرة	0 – 90%	0.01%	±(2% of reading + 0.05% PF)
خسائر القدرة	0 – 2 kW	0.1 mW	±(2% of reading + 1 mW)

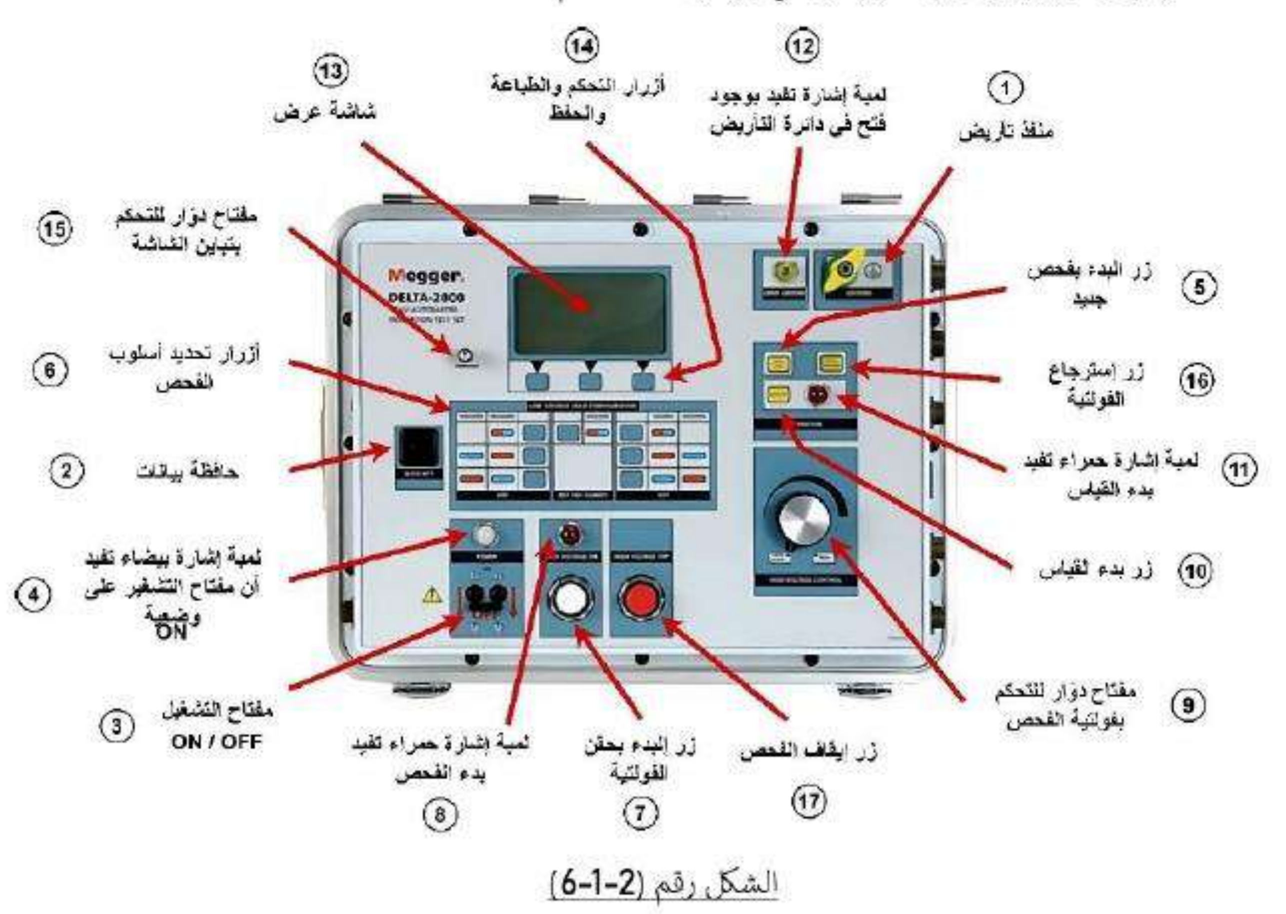
- البيئة التشغيلية المحيطة : **32° F to 122° F (0° C to 50° C) RH to 90%, Non condensing**
- البيئة التخزينية المحيطة : **-58° F to 140° F (-50° C to 50° C) RH to 95%, Non condensing**
- أبعاد وحدة التحكم : **381 x 559 x 406 mm**
- أبعاد وحدة الفولتية المرتفعة: **381 x 559 x 406 mm**
- وزن وحدة التحكم : **74 lb. (33 kg)**
- وزن وحدة الفولتية المرتفعة : **63 lb. (29 kg)**

• خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**5.1** إلى **5.9**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص تيار التهييج.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنبِ لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها تماماً من الشحنات المخزنة.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**)، مع مراعاة عدم إستخدام الجهاز في الأجواء القابلة للإنفجار وكذلك الأجواء الماطرة وفي حال تساقط الثلوج أيضاً.

6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كالآتي:

الشكل (**6-1-2**) يُبين الأجزاء الرئيسية لواجهة وحدة التحكم.



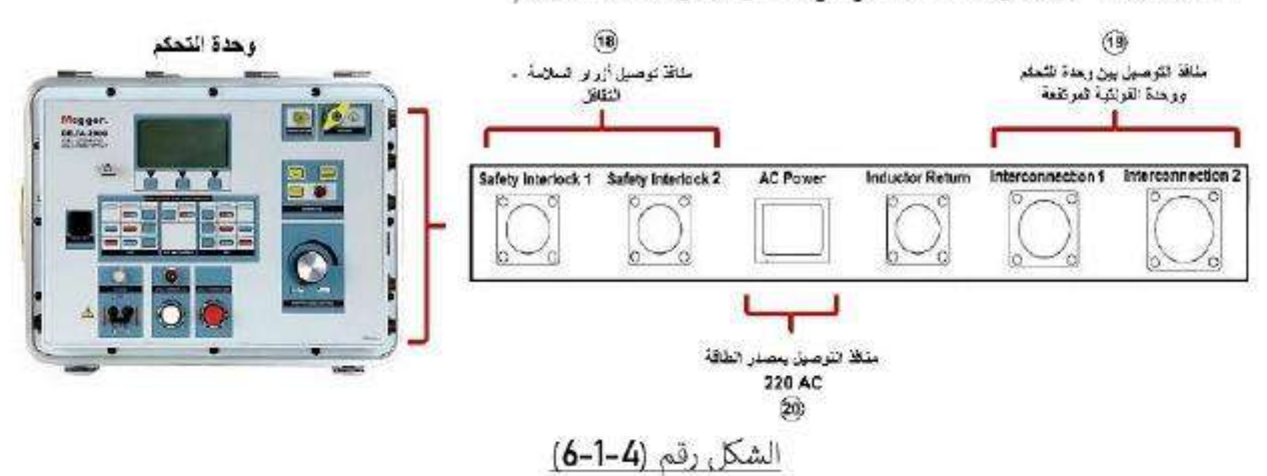
الشكل رقم (**6-1-2**)

الشكل (**6-1-3**) يُبين أزرار تحديد أسلوب الفحص الموجودة على وحدة التحكم.



الشكل رقم (**6-1-3**)

الشكل (6-1-4) يُبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة التحكم.



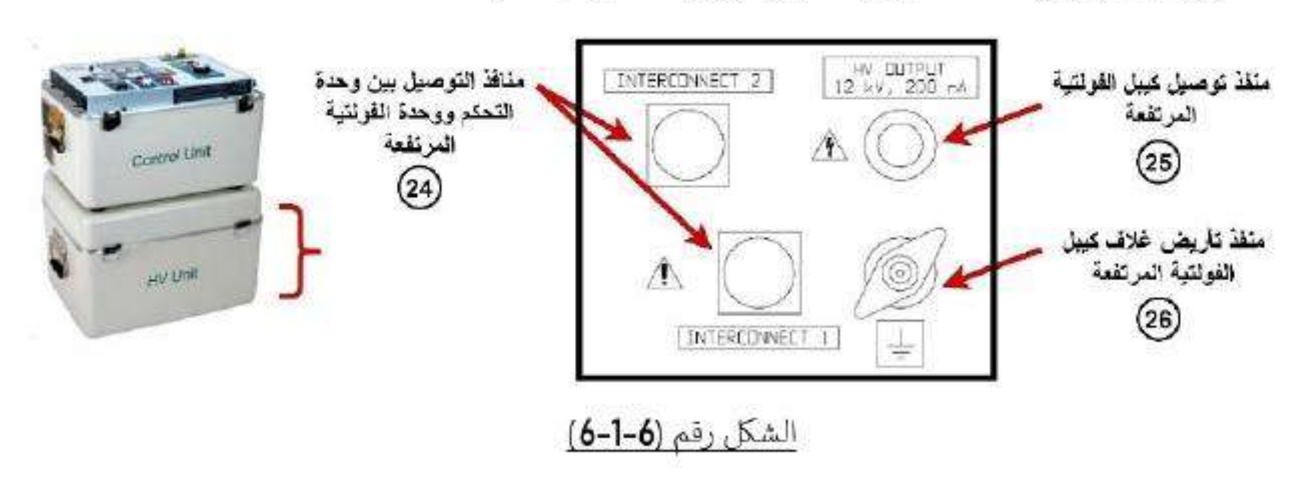
الشكل رقم (6-1-4)

الشكل (6-1-5) يُبين المنافذ الموجودة على يسار وحدة التحكم.



الشكل رقم (6-1-5)

الشكل (6-1-6) يُبين المنافذ الموجودة على يمين وحدة الفولتية المرتفعة.



الشكل رقم (6-1-6)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:

7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.

7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.

7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.

7.4 مراعاة أن يكون سطح الفحص مستوي قدر الإمكان.

7.5 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.

7.6 وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية خطرة.

8. إحضار جهاز الفحص (**DELTA2000**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز على مسافة لا تقل عن (**1.8 m**) عن المحول بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**50°**) درجة مئوية، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.

9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (**3**) في الشكل (**6-1-2**) على وضعية (**OFF O -**) الموضحة على المفتاح.

10. وصل وحدة التحكم بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض رقم (**1**) في الشكل (**6-1-2**) بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنّعة (**4.5m**) متر، مع مراعاة أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله قبل الفحص وآخِر كيبل يتم إزالته عن الجهاز بعد الفحص.

11. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو معاوقة قليلة (**Low Impedance**)، مع مراعاة تأريض جهاز الفحص وخزان المحول من نفس نقطة التأريض.

12. توصيل كوابل الفحص وملحقات جهاز الفحص عبر المنافذ الخاصة بها كالآتي مع مراعاة التأكد من أنها مُحكَمة التركيب على جهاز الفحص وأنها مقفلة (**Locked**):

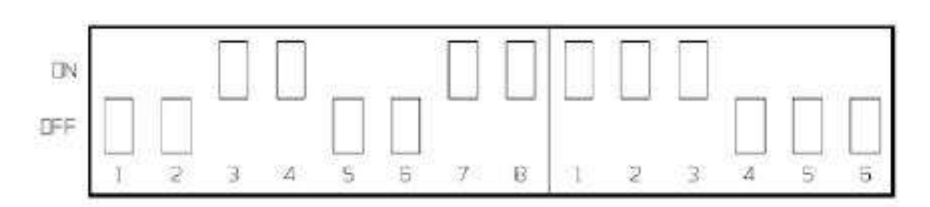
12.1 توصيل كابلين (**2 cables x 1.52m**) على المنافذ رقم (**19**) المبينة في الشكل (**6-1-4**) يمين وحدة التحكم والمنافذ رقم (**24**) يمين وحدة الفولتية المرتفعة المبينة بالشكل (**6-1-6**) تبعاً للتسمية على الجهاز (**Interconnection 1 & 2**)، وذلك للربط بين وحدة التحكم ووحدة الفولتية المرتفعة.

12.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأحمر (كيبل القياس) على المنفذ رقم (**21**) على وحدة التحكم المبين في الشكل (**6-1-5**) على يسار وحدة التحكم.

12.3 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة الأزرق (كيبل القياس) في حال أردنا إستخدامه على المنفذ رقم (**22**) المبين في الشكل (**6-1-5**) على يسار وحدة التحكم.

12.4 توصيل أسلاك أزرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التقافل (**Interlock**) على المنافذ رقم (**18**) المبينة بالشكل (**6-1-4**) يمين وحدة التحكم.

12.5 توصيل الطابعة بجهاز الفحص عبر المنفذ رقم (**23**) المبين في الشكل (**6-1-5**) يسار وحدة التحكم، مع مراعاة وضعية مفاتيح التبديل الثنائي كما هو موضح بالشكل (**6-1-7**).



الشكل رقم (6-1-7)

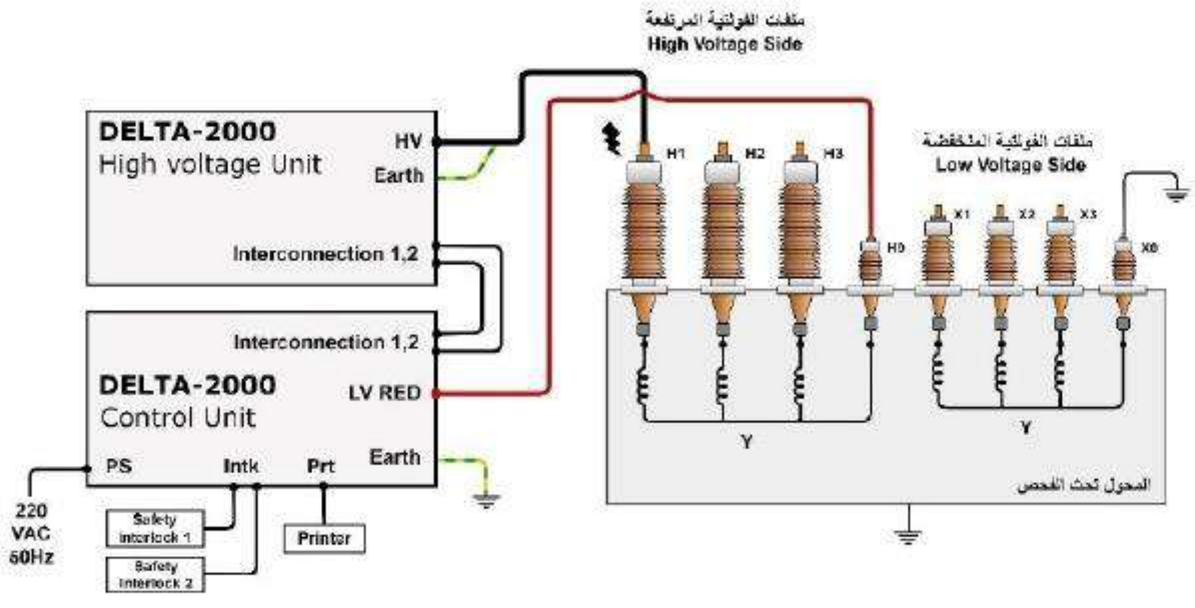
12.6 توصيل كيبل الفولتية المرتفعة (الأسود) بالمنفذ رقم (**25**) المبين في الشكل (**6-1-6**) يمين وحدة الفولتية المرتفعة، مع مراعاة توصيل الغلاف الخارجي لهذا الكيبل (**Sheath**) مع الأرض عبر المنفذ رقم (**26**) المُبين في الشكل (**6-1-6**) يمين وحدة الفولتية المرتفعة.

13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمُعاوقة قليلة (**Low Impedance**).

14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم (**20**) في الشكل (**6-1-4**) بحيث يتم وصل كيبل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.

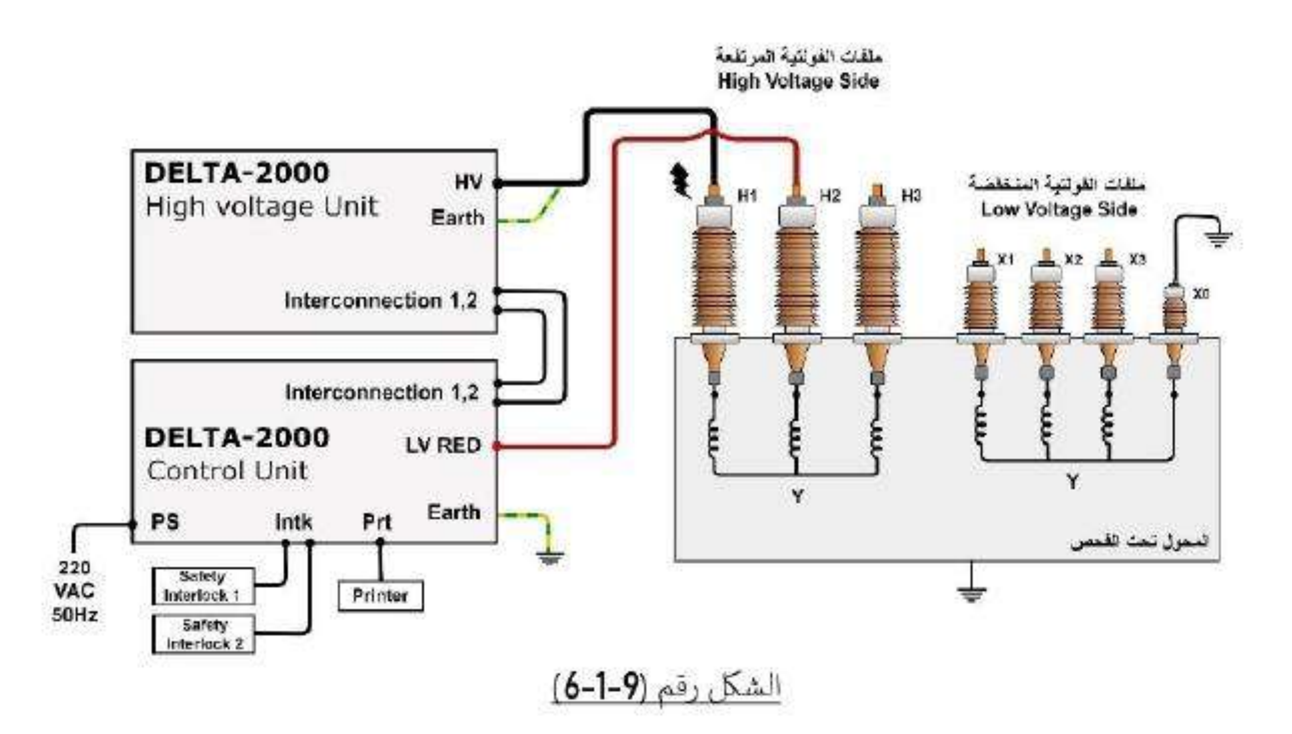
15. توصيل أسلاك الجهاز بالمحول على النحو التالي:

15.1 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three phase two winding**) ذو ملفات فولتية مرتفعة موصولة على شكل نجمة (**Star – Y**) بنقطة تعادل يُمكن الوصول إليها (ظاهرة).



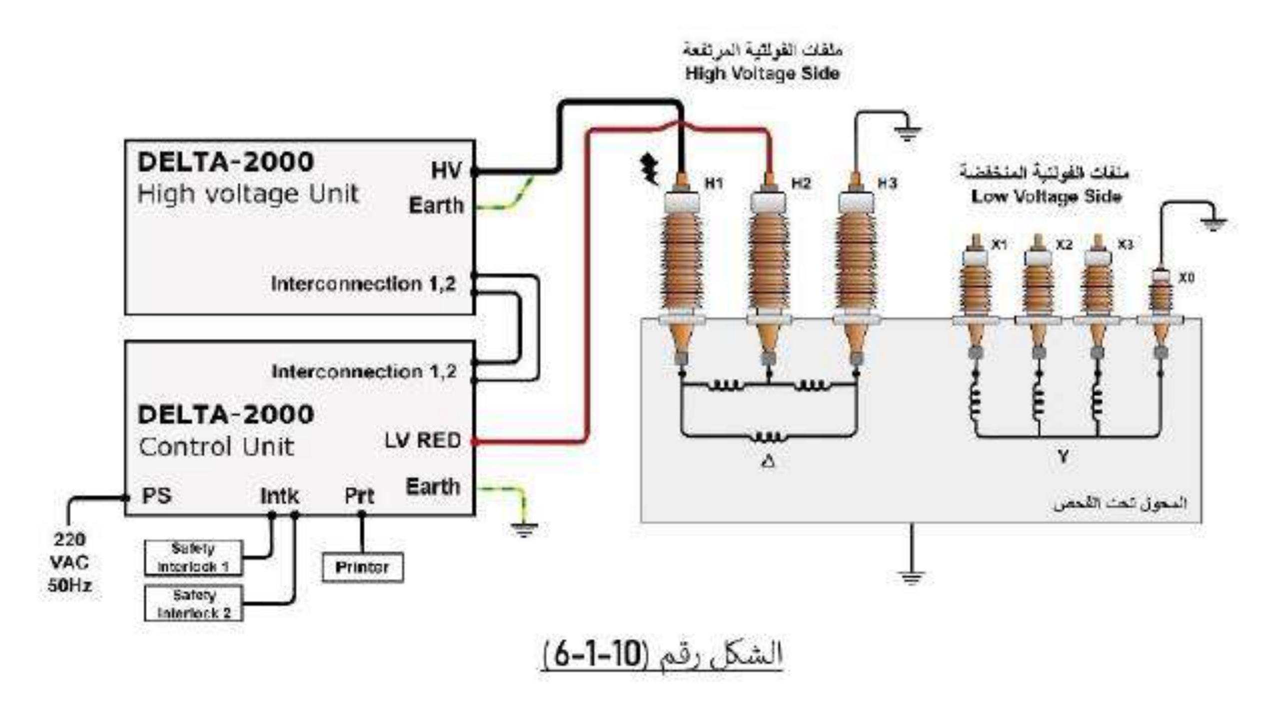
الشكل رقم (6-1-8)

15.2 فحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three phase two winding**) ذو ملفات فولتية مرتفعة موصولة على شكل نجمة (**Star – Y**) بنقطة تعادل لا يُمكن الوصول إليها (غير ظاهرة).



الشكل رقم (6-1-9)

15.3 لفحص محول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three phase two winding**) ذو ملفات فولتية مرتفعة موصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**)

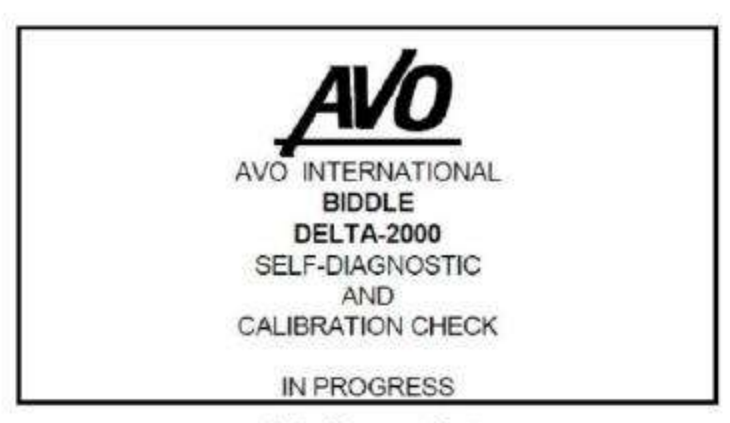


الشكل رقم (6-1-10)

15.4 فيما يخص المحولات ثلاثية الأطوار ثلاثية الملفات (**Three phase tertiary winding**) فإنها يتم معاملتها كالمحولات ثنائية الملفات بحيث يتم فتح أطراف ملفات الفولتية المنخفضة الأولى والثانية مع الإبقاء على تأريض نقطة التعادل (**Neutral point**) إن وجدت.

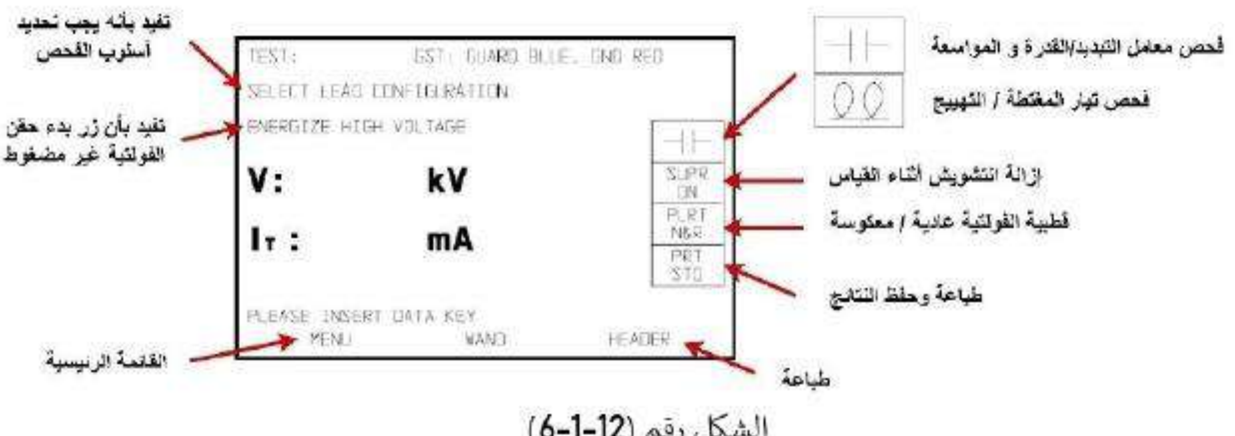
16. بعد عمل توصيلة الفحص المناسبة نقوم بتشغيل جهاز الفحص عن طريق تغيير وضعية (رفع) مفتاح التشغيل رقم (**3**) المُبين في الشكل (**6-1-2**) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة بيضاء اللون رقم (**4**)

المبينة في ذات الشكل. لتظهر لنا الشاشة الإفتتاحية ويبدء الإختبار التشخيصي الذاتي للجهاز كما هو مُبين بالشكل (**6-1-11**).



الشكل رقم (**6-1-11**)

17. بعد نجاح الإختبار التشخيصي الذاتي للجهاز وعدم إيجاد أية أخطاء يقوم الجهاز بالإنتقال لشاشة الفحص الرئيسية والتي من خلالها يُمكن معرفة المعلومات المُبينة بالشكل (**6-1-12**).



الشكل رقم (**6-1-12**)

يُمكن ضبط تباين الشاشة (**Contrast**) بواسطة المفتاح الدوّار رقم (**15**) المبين في الشكل (**6-1-2**).

18. من شاشة الفحص السابقة يُمكن ملاحظة المربعات على يمين الشاشة والتي تشير لبعض إعدادات الجهاز بشكل مختصر فيما إذا كانت مناسبة أو لا، وفي حال أردنا ضبط إعدادت الجهاز والفحص نقوم بإختيار القائمة الرئيسية (**MENU**) المبينة في الشكل (**6-1-12**) وذلك بالضغط على الزر أسفلها، لننتقل للشاشة المُبينة في الشكل (**6-1-13**) والتي من خلالها يُمكن ضبط إعدادات الفحص والجهاز كالآتي بإستخدام الأزرار الثلاثة أسفل شاشة العرض:

18.1 تحديد نوع القياسات (**Measurement**) فيما إذا كان فحص العازل (**AC Insulation test**) وهو الفحص الذي تم شرحه في الفصل السابق، أو إختيار فحص تيار المغنطة / التهييج (**XFMR Excitation current test**) وهو ما يجب إختياره هنا.

18.2 تحديد قيمة فولتية التصحيح (**Correction**) بإختيار (**10kV**) أو (**2.5kV**) كيلوفولت أو إلغاء التصحيح (**None**).

18.3 تشغيل أو إيقاف إزالة التشويش (**Interference Suppressor**) وذلك بإختيار تشغيل (**ON**) إذا كانت منطقة الفحص عرضة للتشويش كفحص المحولات في محطات التحويل المُكهربة (**Energized**) مرتفعة الفولتية.

18.4 تحديد قطبية فولتية الفحص المُطبقة (**HV Polarity**) فيما إذا كانت عادية (**Normal**) أو عادية ومعكوسة (**Normal/Reverse**) وذلك للتخلّص من تأثير تيارات التشويش الكهروستاتيكية الناتجة عادة من محطات التحويل المجاورة ذات الفولتية المنخفضة.

بالإضافة إلى مجموعة من الإعدادات الأخرى الخاصة بطباعة وحفظ النتائج وضبط الوقت ومعايرة الجهاز وغيرها من الإعدادات.

EXIT TO TEST	11/26/96	10:27
MEASUREMENT:	AC INSULATION TEST (or) XFMR EXCITATION TEST	
CORRECTION:	NONE (or) 10 kV (or) 2.5 kV	
LOSS DISPLAY: POWER FACTOR (or) DISSIPATION FACTOR		
INTERFERENCE SUPPRESSOR:	ON (or) OFF	
HV POLARITY: NORMAL/REVERSE (or) NORMAL ONLY		
NEXT MENU		
ENTER (OR) CHANGE	UP	DOWN

الشكل رقم (**6-1-13**)

19. بعد الإنتهاء من ضبط إعدادات الفحص والجهاز نقوم بإختيار (**EXIT TO TEST**) من الشكل (**6-1-13**) وذلك للرجوع لشاشة الفحص الرئيسية المبينة في الشكل (**6-1-12**). ومن ثم نقوم بالضغط على زر فحص جديد (**New test**) رقم (**5**) المبين في الشكل (**6-1-2**).

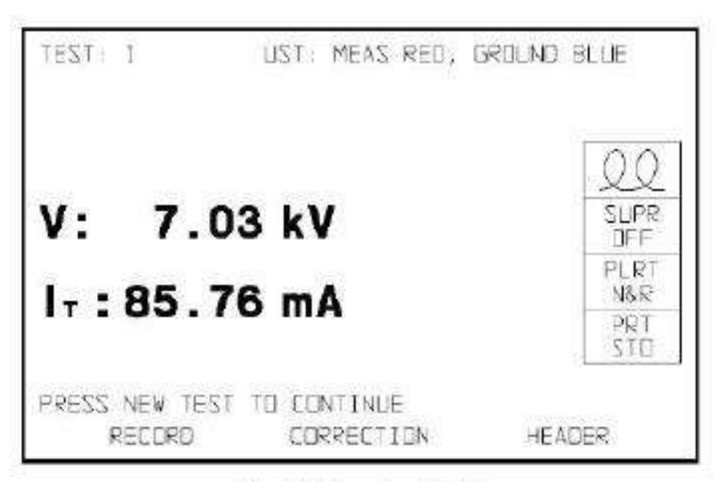
20. إختيار أسلوب فحص العيّنة غير المؤرضة (**UST**) بالضغط على الزر رقم (**2**) المبين في الشكل (**6-1-3**).

21. الضغط على أزرار السلامة أو كما يُسمى بنظام التقافل (**Safety Interlock Push Buttons 1&2**) معاً و نبقيهما بهذه الحالة حتى إنتهاء الفحص كما هو مُبين بالشكل (**6-1-14**)، ويُنصح بأن يكون واحد من هذه الأزرار مع مشغل الجهاز والزر الثاني مع شخص آخر لزيادة السلامة في الحالات الطارئة. حيث أنه في حالات الطوارئ أثناء الفحص نوقف الضغط على هذ الأزرار لإيقاف حقن الفولتية أو نقوم بالضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (**17**) المبين في الشكل (**6-1-2**).



الشكل رقم (6-1-14)

22. تصفير المفتاح الدوّار (**9**) المُبين في الشكل (**6-1-2**) أي جعله على وضعية (**ZERO START**).
23. الضغط على زر البدء بحقن الفولتية الأبيض (**7**) المبين في الشكل (**6-1-2**) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة الحمراء (**8**) المبينة في الشكل (**6-1-2**) والتي تفيد بدء حقن الفولتية.
24. البدء بتحريك المفتاح الدوّار (**9**) لرفع الفولتية وتثبيتها عند الفولتية المُراد فحص المُعدّة عندها وفي حالتنا هذه سنختار (**7kV**) كيلوفولت. (يُمكن الإعتماد على فقرة تحديد الفولتية المضمنة في خطوات وأساليب الفحص (**5**) من هذا الفصل)
25. نقوم بالضغط على زر القياس (**MEASURE**) رقم (**10**) المبين في الشكل (**6-1-2**) وملاحظة إنارة لمبة الإشارة الحمراء (**11**) المبينة في الشكل (**6-1-2**) والتي تفيد بدء القياس حيث تنطفأ هذه اللمبة عند إنتهاء القياس ولكنها لا تعني عدم وجود فولتية.
26. بعد الإنتهاء من القياس تظهر نتيجة الفحص على الشاشة المُبينة في الشكل (**6-1-15**) حيث يُمكن الأن إيقاف الضغط على أزرار السلامة (**Interlock pushbuttons 1&2**).



الشكل رقم (6-1-15)

27. يُمكن طباعة النتيجة عبر الضغط على الزر أسفل كلمة (**Header**) الظاهرة على شاشة العرض لطباعة النتيجة وحفظها كما هو مبين بالشكل (**6-1-16**).

```
DATE: 11/22/96    10:28
TEST ID NO.:  XFMR - 123 - SS 3
TEMPERATURE (°C): 27.6
TEST MODE:   UST: MEAS RED, GND BLUE
MEASUREMENT:  XFMR EXCITATION TEST
VOLTAGE:   7.03 kV
CURRENT:  85.76 mA
              122 mA @ 10 kV
```

الشكل رقم (**6-1-16**)

28. بعد ذلك يمكن الضغط على زر إيقاف الفحص الأحمر (**17**) المبين في الشكل (**6-1-2**) وكذلك تغيير وضعية المفتاح الدوّار (**9**) إلى الصفر في حال أردنا إنهاء الفحص، ولكن إذا أردنا إجراء فحص آخر يُمكن الضغط على زر فحص جديد (**5**) المبين في الشكل (**6-1-2**) و إعادة الخطوات من الخطوة (**19**) إلى آخِر الخطوات.

الفصل السابع

فحص مُفاعلة التسرُب

Leakage Reactance Test



فحص مُفاعلة التسرُب

Leakage Reactance Test

يُعتبر فحص مُفاعلة التسرُب من الفحوصات الأكثر حساسية في الكشف عن حالة ملفات المحول في حال تعرضها لأي نوع من أنواع التشوّه والإختلاف في تركيبها الفيزيائي، حيث يُعبّر هذا الفحص عن كميّة الفيض المغناطيسي المُتسرب (الطاقة الضائعة) في المحول عند تطبيق فولتية مترددة على ملفاته الإبتدائية لأحد الأطوار في حين ملفاته الثانوية لنفس الطور مقصورة (**Short circuited**)، أو بمعنى آخر فإنه يُعبّر عن جزء من الطاقة الضائعة أو الهبوط في الفولتية أثناء قيام المحول بعمله وهو تزويد الحمل بالطاقة الكهربائية اللازمة أو في حال كانت ملفاته الثانوية مقصورة. كما ويُمثل هذا الفحص النسخة الموقعيّة (**Site test**) آحادية الطور من فحص دائرة القِصَر المصنعي (**Short circuit test**) من حيث المبدأ مع وجود تغييرات في طريقة الفحص. ونظراً لأن فولتية الفحص أقل من قيمة الفولتية الإسمية للمحول فإن هذا الفحص يُعد من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**).

في المحولات المثالية تكون الطاقة الداخلة (**Energy in**) مساوية للطاقة الخارجة (**Energy out**) ولكن لا يوجد ما يُسمى بالمحول المثالي واقعياً وذلك لوجود عناصر بالمحول تستهلك طاقة على شكل ضياعات في حالتي الحمل (**Load**) واللاحمل (**No-load**) والتي من شأنها عمل فرق بين الطاقة الداخلة للمحول والخارجة منه ومن هذه العناصر:

- ✓ مقاومة الملفات (**Winding Resistance**) وما ينتج عنها من ضياعات تُسمى بالضياعات النحاسية (**Copper Losses**) والتي يُشار إليها عادةً بالـ(I^2R).
- ✓ مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) وما ينتج عنها من هبوط في الفولتية على طرفيّ المحول.
- ✓ مُمانعة القلب الحديدي لمرور الفيض المغناطيسي (**Reluctance**) وما ينتج عنها من خسائر في الدائرة المغناطيسية.
- ✓ التيارات الدوّارة (**Circulating currents**) والخاصيّة الهستيرية (**Hysteresis**) وما ينتج عنها من ضياعات ثابتة.

ونظراً لأن هذا الفحص يتم إجراؤه أثناء قَصر (**Short circuit**) أطراف الملفات الثانوية للمحول فإن هذا الفحص يُعطي قيمة ضياعات الحمل أو القِصَر في حالتنا هذه. وتعتمد ضياعات الحمل (**load losses**) على مقدار التيار المار في الملفات والذي بدوره يزيد مقدار الفيض المُتسرب (**Leakage Flux**) المُشار إليه في هذا الفحص بمُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**). حيث يُمكن تعريف الفيض المُتسرب (**Leakage flux**) على أنه الفيض الذي لا ينتقل عبر القلب الحديدي من الملفات الإبتدائية إلى الملفات الثانوية وأيضا لا يقطع الملفات الثانوية بشكل مباشر وإنما يكون بالمنطقة الفاصلة مابين الملفات أو يقطع الملفات الإبتدائية فقط. أي بمعنى آخر يُمكن تحديد المسار الخاص بهذا الفيض المُتسرب بأنه المواد العازلة بين الملفات من مواد صلبة؛ كالورق والخشب أو سائلة؛ كالزيت أو الفيض في الهواء الخارجي بالإضافة للفيض الذي يَقطع الملفات المنتجة له.

ومما سبق فإن أي تغيير في قيمة هذه المُفاعلة الحثية (**Leakage Reactance**) عن القِيَم المَصنعيّة أو المرجعيّة سيُمثل إختلاف في حجم المسار التسرُبي لهذا الفيض سابق الذِكر، والذي يعكس الإختلاف في الحالة الفيزيائية (الميكانيكية) الداخلية للمحول كتغيُّر المسافة الفاصلة بين الملفات (**Winding Geometry**) نتيجة لصدمة ميكانيكية خاصة أثناء نقل المحول من مكان لآخَر أو تقادم المحول أو حدوث قِصر أدى إلى نشوء تيارات عالية من شأنها التأثير بقوى ميكانيكية على الملفات مما أدى لتغيير الأبعاد الداخلية لملفات هذا المحول، ويُعتبر هذا الفحص بالإضافة لفحص المواسعة وفحص تيار التهييج وفحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (**SFRA**) من الفحوصات المُكمّلة لبعضها، حيث أن فحص تيار التهييج يعتمد على قيمة مُمانعة القلب الحديدي (**Core Reluctance**) كما تم شرحه في الفصل السادس من هذا الكتاب، أما فحص مُفاعلة التسرُب فهو يساعد في الكشف عن تشوّه الملفات بالإعتماد على قيمة مُمانعة الفراغ أو المسار التسرُبي (**Space Reluctance**) أي مسار المجال المغناطيسي خارج القلب الحديدي، أما فحص المواسعة فهو أيضاً يساعد في الكشف عن تشوّه الملفات بالإعتماد على قيمة المواسعة كما تم شرحه في الفصل الخامس من هذ الكتاب. حيث أنه تشوّه الملفات (**Winding Deformation**) الكبير قد يؤدي لفشل المحول مباشرة أو إذا كان هذا التشوّه صغير قد يؤدي لفشل المحول بعد مدة من الزمن قد تصل لعدة سنوات.

دعائم تثبيت القلب
القلب الحديدي
LV
HV
فيض مُتسرب

الشكل رقم (7-1)

وكما ذكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل و النظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أيٍ من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكّن من الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي وذلك بالكشف عن أي تشوّه أو إزاحة لملفات المحول.



ملحوظة (7-1): بالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء و الإلكترونيات (**IEEE**) فإن هذا الفحص يُسمى فحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**)، أما اللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) فقد إعتمدت إسماً آخَر وهو فحص مُعاوقة القِصَر (**Short circuit Impedance**).

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعُنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أُخرى، وتتلّخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المَصنعيّة (**Quality Control - QC**) وكذلك يُعتبر من فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) تحت مُسمى فحص مُعاوقة القِصَر (**Short Circuit Impedance**) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم قبل نقله للموقع.

1.2 في الموقع قبل كهربة المحول للمرة الأولى (**Transformer first energization**) كأحد فحوصات القُبول المَوقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد نقل المحول من مكان لآخَر.

1.4 بشكل روتيني (**Routine test**) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (**Reference value**).

1.5 تحديد الأعطال داخل المحول (**Fault detection - Diagnostic test**)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن أي تشوّه أو إزاحة لملفات المحول لذلك عادة ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرض المحول لظروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على ملفات وقلب المحول الحديدي وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- تعرُّض المحول لإجهاد ميكانيكي ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (**Earth faults**) أو أعطال القِصَر (**Short circuit**) أو ضربات البرق (**Lightning**) وما ينتج عنها من تيارات ذات قِيَم مُرتفعة، أو تعرُّض المحول لتيارات بدء (تدفق) مُرتفعة (**High inrush currents**).
- تعرُّض المحول لفصل قَسري (**Trip**) نتيجة لتفعّل مُرحل البوخلز (**Buchholz relay**) أو مرحل إرتفاع الضغط المفاجئ (**Sudden pressure relay**) أو غيره من الحمايات الفيزيائية.
- ظهور قِيَم مُرتفعة لنِسَب الغازات القابلة للإحتراق الذائبة في زيت المحول (**Dissolved combustible gas**).

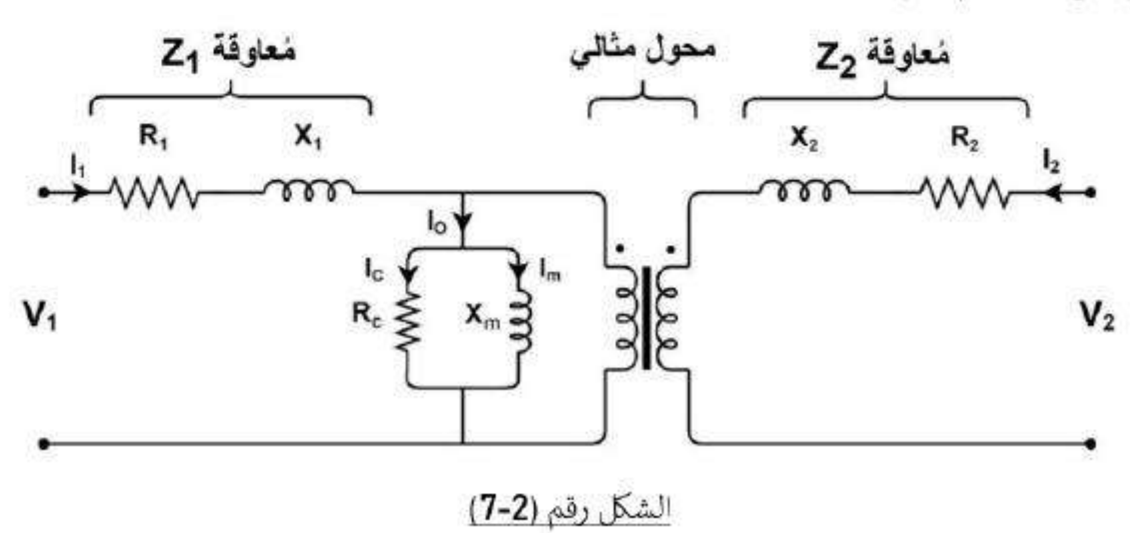
- قراءات غير جيدة لجهاز تسجيل الصدمات (**Impact recorder**)، حيث أن هذه الجهاز يتم تثبيته على جسم المحول أثناء نقله للتأكد من عدم تعرض المحول للصدمات فوق الحدود المسموح بها كتعرضه لصدمة ميكانيكية كبيرة كالسقوط أثناء عملية النقل.
- الهزات الناتجه عن الزلازل أو غيرها من الكوارث الطبيعية والتي قد تُلحِق ضرراً ميكانيكياً بالمحول.
- إرتفاع درجة حرارة ملفات المحول حيث أن الإرتفاع في قيمة الفيض المُتسرب يؤدي لإرتفاع قيمة مقاومة الملفات نتيجة للظاهرة القِشرية (**Skin Effect**) والذي بدوره يزيد من قيمة الضياعات النحاسية أو ضياعات الحمل وما ينتج عنها من إرتفاع في درجة حرارة الملفات.
- في حال الحصول على نتائج فحوصات غير مُرضية خاصة لفحص المواسعة (**Capacitance**) أو فحص تيار التهييج (**Excitation current**) أو فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (**SFRA**).

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص وجود تغيُّر في الحالة الفيزيائية (الميكانيكية) للملفات مثل حدوث تشوّه أو إزاحة (**Winding Deformation or Displacement**) ناتج عن الأسباب سابقة الذِكر أو غيرها من الأسباب كحدوث كسر لدعائم التثبيت الداخلية أدى لحدوث هذا التشوّه.

ففي حال تعرض المحول للصدمات أو الإهتزازات أو السقوط أثناء النقل فإنه يَسهُل تصوّر السبب الذي أدى لتشوّه بُنية الملفات الفيزيائية، أما فيما يخُص التشوّه الناتج عن التيارات المرتفعة كتيارات البدء (**Inrush currents**) وتيارات العُطل (**Fault currents**) ولفهم آلية حدوثه يُمكن إيجاد الملحق (**7-2**).

3. فلسفة الفحص

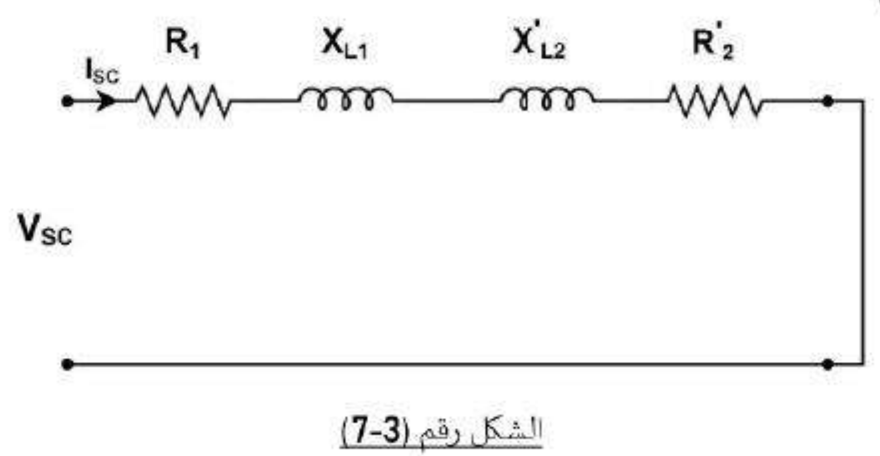
قبل الخوض في تفاصيل الفحص لا بُد من الإشارة إلى أن الدائرة المُكافئة للمحول كما ذُكر سابقاً تتكون من مُعاوقة (**Impedance** - Z) لملفاتها الإبتدائية والثانوية والتي بدورها تتكون من مقاومة (**Resistance** - R) ومُفاعلة حثية (**Reactance** - X_L) على التوالي، بالإضافة لمقاومة (**Resistance** – R_C) ومُفاعلة حثية (**reactance** – X_m) موصولة على التوازي تُمثل الدائرة المغناطيسية للمحول كما هو مبين بالشكل (**7-2**).



الشكل رقم (**7-2**)

وتكون هذه المُعاوقة (Z – **Impedance**) المسؤولة عن الهبوط بالفولتية على أطراف المحول وضياعات الحمل للمحول بالإضافة إلى أنها تُعطي إنطباع عن سلوك المحول في حال حدوث أعطال القِصَر كما وأنها ذات قيمة مؤثرة في الحد من تيارات العطل، لذلك عند تصميم المحولات تتم مراعاة أن تكون هذه المُعاوقة ليست ذات قيمة كبيرة لكي لا يزداد الهبوط بالفولتية وضياعات الحمل وكذلك يجب أن لا تكون قيمتها مُتدنية لما لها من دور في الحد من تيارات العطل. ففي طور التصنيع للمحول يتم إجراء فحص دائرة القِصَر المَصنعي (**Short Circuit Test**) وذلك للتأكد من قيمة مُعاوقة القِصَر للمحول (**SC Impedance**)، حيث بالرجوع إلى معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.12.00 2015]** و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير (**ANSI**) فإن نسبة التباين عن القِيَم التصميمية لمُعاوقة المحولات ثنائية الملفات يجب أن لا تتجاوز (**±7.5%**) للمُعاوقات الأكبر من (**2.5%**) وما نسبته (**±10%**) من التباين للمُعاوقات الأقل أو المساوية لـ(**2.5%**)، أم فيما يخُص معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-1 2011]** فإن نسبة التباين عن القِيَم التصميمية لمُعاوقة المحولات ثنائية الملفات يجب أن لا تتجاوز (**±7.5%**) للمُعاوقات الأكبر من (**10%**) وما نسبته (**±10%**) من التباين للمعاوقات الأقل من (**10%**).

عند سريان التيار الكهربائي في ملفات المحول سيؤدي ذلك إلى نشوء مجال مِغناطيسي من شأنه الإنتقال من الملفات الإبتدائية للملفات الثانوية عبر القلب الحديدي (**Iron core**) للمحول، ولكن هنالك جزء من هذا المجال يتسرب خارج القلب الحديدي (**Leakage flux**) والذي يتم تمثيله كمُفاعلة حِثية (X_L - **Reactance**) أو كما تُسمى مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) وهي أحد أسباب هبوط الفولتية على أطراف الملفات الثانوية للمحول، وتعتمد قيمة هذا المُفاعلة على عدد اللفات (**N**) وعلى قيمة تيار الحمل حيث كلما زاد التيار زاد الفيض وزاد معه الفيض المُتسرب، بالإضافة إلى أنها تعتمد أيضاً على الأبعاد الهندسية الداخلية للملفات والقلب الحديدي (**Core and Winding Geometry**) وهو ما يُفيد في معرفة حالة المحول الداخلية في حال إختلاف قيمة هذه المُفاعلة الحثية.
الشكل (**7-3**) يُمثل الدائرة المُكافئة للمحول عند تطبيق فحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**).

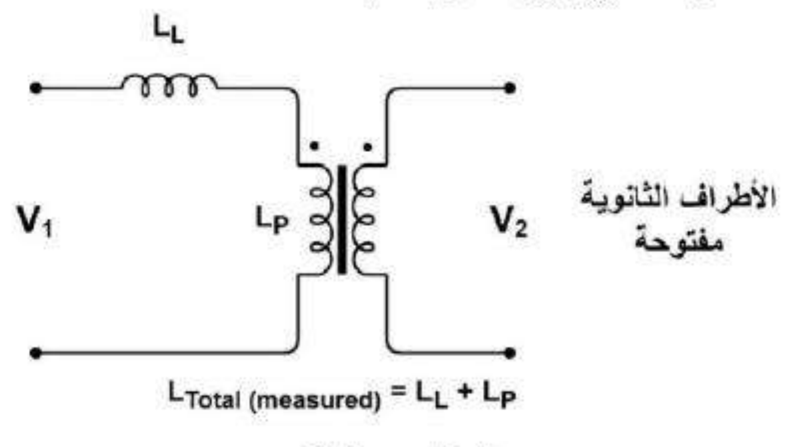


الشكل رقم (7-3)



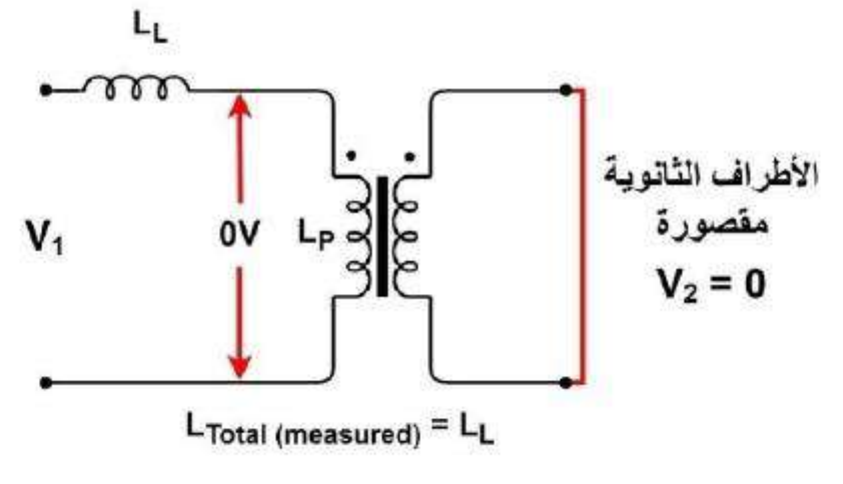
ملحوظة (7-2): تم إهمال المُركّبات (X_m و R_C) الموجودة على التوازي بالدائرة المكافئة والتي تُمثل الدائرة المِغناطيسية للمحول وذلك لقيمة تيار التهييج (I_m) المنخفضة.

من الشكل (7-3) السابق يُمكن ملاحظة إزالة المحول المثالي من الدائرة المكافئة للفحص علماً بأن المحول المثالي يكون ذو محاثة إبتدائية (L_p) تُمثِّل الملفات نفسها وكذلك الحال للملفات الثانوية (L_S)، ويعود السبب في إزالته إلى دائرة القِصَر (SC) المُطبقة على ملفات المحول الثانوية حيث قبل تطبيق دائرة القِصَر (SC) فإن قيمة المحاثة للملفات الإبتدائية الكُلية ستساوي (LL + LP) أي محاثة التسرُب مضافاً إليها محاثة الملفات نفسها كما هو مُبين بالشكل (7-4).



الشكل رقم (7-4)

ولكن عند تطبيق دائرة قِصَر على الملفات الثانوية فإن فولتية الملفات الثانوية نظرياً ستساوي الصفر ($E2 = 0$)، مما يعني أن فولتية الملفات الإبتدائية أيضا ستساوي الصفر أيضاً ($E1 = 0$) كما هو مبين بالشكل (7-5)، مما يجعل محاثة الملفات الإبتدائية مساوية للصفر ($L_P = 0$) ويجعل محاثة التسرُب وحيدة مما يُسهّل قياسها وهذا بدوره يُفسّر وظيفة دائرة القِصَر عند إجراء هذا الفحص.



الشكل رقم (7-5)

وبعد عمل دائرة قِصَر (Short circuit) على الملفات الثانوية يتم تطبيق فولتية على الملفات الإبتدائية وقياس الفولتية والتيار والخسائر في القدرة (Watt loss)، ومن ثم وبالإعتماد على القِيَم المُقاسة يتم إحتساب قيمة مُفاعلة التسرُب (Leakage Reactance).

معلومة إضافية: عبر تطبيق فحص دائرة القِصَر المصنعي (Short circuit test) يُمكن إستخراج قيمة مُعاوقة المحول (Impedance - Z) بالنسبة المئوية (%) وتُمثل هذه المُعاوقة مقدار الهبوط بالفولتية

على أطراف الملفات الثانوية عند تطبيق الفولتية الإسمية على الملفات الإبتدائية عند الحمل الكامل للمحول (أو في حالة قَصر الملفات الثانوية) كما هو مُبين بالمعادلة (**7.1**).

$$V_{drop} = Z\% = \frac{I_{Full} \cdot Z}{E} \, x \, 100\% \qquad (7.1)$$

حيث:

- V_{drop} : نسبة الهبوط بالفولتية.
- $Z\%$: نسبة مُعاوقة القِصَر (**Short circuit impedance %**).
- I_{Full} : تيار الحمل الكامل (**Full load current**).
- E : فولتية الأطراف المفتوحة (**Open circuit voltage**).
- Z : قيمة المُعاوقة والتي تتكون من المقاومة (**R**) والمُفاعلة الحثية (**XL**).

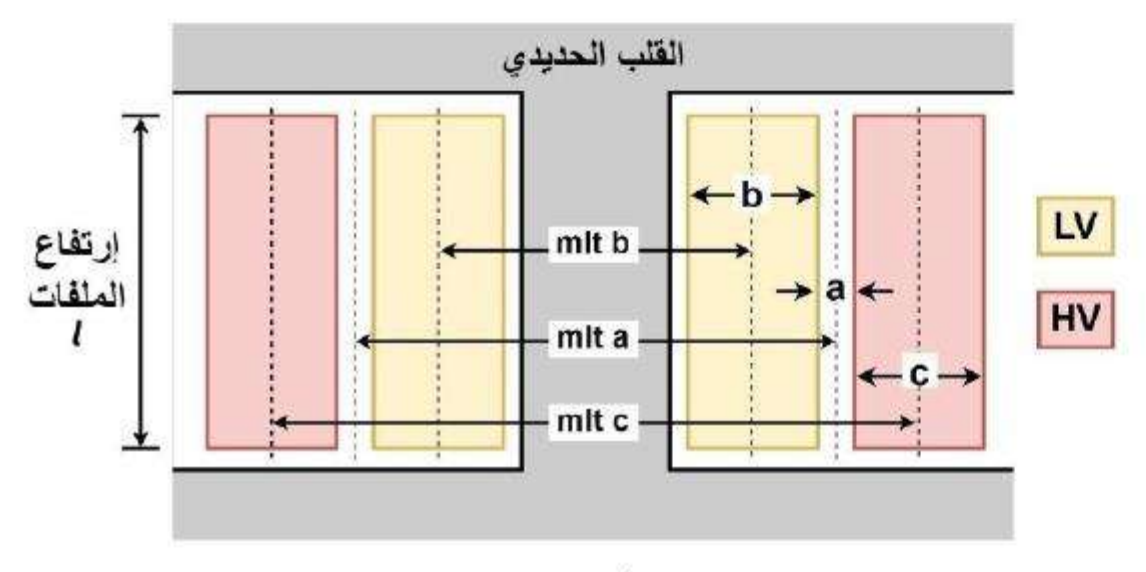
ونظراً لأن المقاومة المادية (**Resistance - R**) تُشكل جزء صغير من المعاوقة (**Impedance - Z**) وذلك بسبب قيمة معامل القدرة (**Power Factor - PF**) المرتفعة في حالة قَصر الملفات الثانوية (شبه حمل حثي خالص) فإنه يُمكن إعتبار أن (**XL ≈ Z**)، وعادة ما تكون قيمة المُعاوقة (**Z%**) محصورة من (**4 – 20 %**) لمحولات القدرة.



ملحوظة: يُفضل أن تكون قيمة المُعاوقة (**Impedance - Z**) مرتفعة من وُجهة نظر مُشغلي الشبكة الكهربائية (**Grid**) وذلك لما لها من دور في الحد من تيارات القِصَر، أما فيما يَخُص المُنشأة المالكة للمحول فإنه يُفضَل أن تكون قيمة هذه المُعاوقة قليلة وذلك للتقليل من قيمة الهبوط في الفولتية على أطراف المحول الثانوية و تقليل ضياعات الحمل (**Load loss**) داخل المحول.

- **وبقى التساؤل المطروح "كيف يَدُل فحص مُفاعلة التسرُب (Leakage Reactance) على وجود تشوّه في ملفات المحول؟"**

كما هو معلوم فإن قيمة مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) للمحول تعتمد على عدد اللفات (**N**) ومقدار التيار في الملفات وما ينتُج عنه من الفيض المُتسرب (**Leakage flux**) بالإضافة إلى هندسية القلب الحديدي للمحول (**Core geometry**) كما هو مُبين في الشكل (**6-7**)، فبالتالي أي تغيُّر في الأبعاد الهندسية للمحول من الداخل (خاصة أبعاد القلب الحديدي وما ينتج عنه من إختلاف في المسافة الفاصلة بين الملفات) سوف يؤدي إلى إختلاف المسار التسرُبي للفيض الإبتدائي مما يَعكس تغيُّر في قيمة مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) والذي بدروه يُعطي إشارة عن وجود إختلاف في هذه الأبعاد الداخلية للمحول.



الشكل رقم (7-6)

والمعادلة (**7.2**) التالية توضح تأثير أبعاد المحول الداخلية على قيمة مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**):

$$X\% = \frac{KF(3amlt_a + \ bmlt_b + \ cmlt_c)}{\phi_m \, l} \qquad (7.2)$$

حيث؛

K : ثابت يعتمد على نظام الوحدات المُستخدم.

F : مقدار التيار لكل لفة.

ϕ_m : القيمة العُظمى للفيض المغناطيسي في القلب الحديدي للمحول.

وفيما يخُص باقي الرموز يُمكن إيجادها من الشكل (**7-6**) السابق.

ومنه فإن قيمة مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) تدُل على حدوث إزاحة أو تشوّه للملفات قد يكون ناتج عن حدوث صدمة ميكانيكية أو حدوث عطل ذو تيارات عالية أدى إلى تغيُّر هندسية الملفات وإختلاف المسار التسرُبي للفيض المغناطيسي داخل المحول.

4. أساليب الفحص

بالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) يُمكن إجراء هذا الفحص بإستخدام الأساليب التالية:

4.1 الأسلوب الأول: الفحص آحادي الطور - Per phase test

في هذه الطريقة يتم الفحص لكل طور على حدا وذلك بتطبيق فولتية مترددة (**AC**) على طور واحد فقط من الملفات الإبتدائية ذات الفولتية المرتفعة للمحول (**HV side**) مع مراعاة قَصر (**SC**) أطراف نفس الطور من الملفات الثانوية ذات الفولتية المنخفضة للمحول (**LV side**)، حيث أن الملفات لنفس الطور

يُقصد بها الملفات الإبتدائية والثانوية الموجودة على نفس العامود للقلب الحديدي (**Limb**) والتي يُمكن تحديديها بطُرق متعددة سيتم التطرق لها. كما وتجدُر الإشارة إلى أن الفحص بهذا الأسلوب لا يُمكن تطبيقه على جميع المحولات خاصة تلك التي لا تحتوي على نقطة تعادل (**Neutral Point**) ظاهرة.



ملحوظة (3-7): في هذا الأسلوب وبما ان نتيجة الفحص لا يتم مقارنتها بالقيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول (**Nameplate**) فإن وضعية مُغيّر الخطوة غير مهمة ولا يجب أن يكون على نفس الخطوة (**Tap**) التي تم إجراء فحص القِصَر المَصنعي عندها، حيث انه في هذا الأسلوب يتم الإكتفاء بمقارنة نتائج الفحص بين الأطوار الثلاثة وملاحظة إختلافها.

- **المعدات المستخدمة بالفحص:**
  - **مصدر كهربائي:** مصدر فولتية آحادي الطور متردد مُتحكم به (**Single phase regulated AC power supply**)، عادةً ما يتم إستخدام (**VARIAC 0-300V, 10A**) مع مراعاة أن يكون المصدر مُعاير (**Calibrated**).
  - **جهاز قياس تيار متردد (AC) رقمي (True RMS Digital Ammeter):** ذو دقة عالية (**high Accuracy**) على الأقل (**0.5%**) وكذلك ذو تدريج (**Scale**) مناسب لقِيَم الفحص مع مراعاة أن يكون جهاز الفحص مُعاير (**Calibrated**).
  - **جهاز قياس فولتية مترددة (AC) رقمي (True RMS Digital Voltmeter):** ذو دقة عالية (**high Accuracy**) على الأقل (**0.5%**) وكذلك ذو تدريج (**Scale**) مناسب لقِيَم الفحص مع مراعاة أن يكون جهاز الفحص مُعاير (**Calibrated**).
  - **جهاز قياس قدرة فعالة (Active power)** مُعايير (**Calibrated**).
  - **أسلاك توصيل:** يجب أن تكون أسلاك التوصيل أقصر ما يُمكن بالإضافة إلى أن تكون مناسبة للتيار الذي سيَمُر بها، وذلك تجنباً لإضافة مقاومة غير مرغوب بها لدائرة الفحص في حال كانت الأسلاك غير مناسبة مثل أن تكون الأسلاك ذات مساحة مقطع عرضي صغير أو من مادة ذات موصلية رديئة مما يُضيف مقاومة غير مرغوب بها لدائرة الفحص ستؤثر على نتيجة الفحص، حيث أن أقل مساحة مقطع (**Cross-section**) موصى به عند إجراء هذا الفحص هي (**1AWG**) أي ما يُعادل (**42.4** mm^2) كما ورد في مِعيار معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.152-2013]**.

- **توصيلة الفحص:**

تعتمد توصيلة الفحص على مجموعة التوصيل للمحول (**Vector group**) حيث يجب تطبيق الفولتية على أطراف الملف الإبتدائي لأحد أطوار الفولتية المرتفعة وقَصر (**SC**) أطراف الملف الثانوي لنفس الطور على جهة الفولتية المنخفضة.

فكما ورد سابقاً أن الفحص بهذا الأسلوب لا يُمكن تطبيقه على جميع مجموعات التوصيل الخاصة بالمحولات خاصة تلك التي لا تحتوي على نقطة تعادل (**Neutral Point**) ظاهرة، حيث أن مجموعات التوصيل التي يُمكن تطبيق هذه الأسلوب عليها يُمكن حصرها بالجدول الآتي:

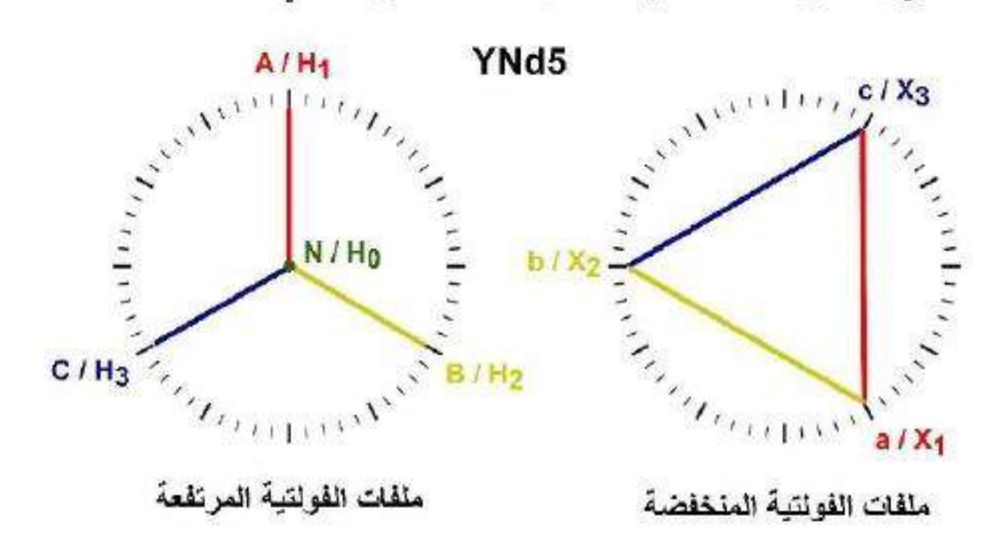
الجدول رقم (7-1)

مجموعة التوصيل – Vector Group	
YNd	YNyn
Dyn	Dd

ويبقى التساؤول المطروح "كيف يُمكن تحديد أطراف الطور المُراد تطبيق الفولتية عليه وأطراف الطور التي يجب قَصرها (Short circuited)؟"

لتحديد أطراف المحول يُمكن الإعتماد على الجداول الواردة في المُلحق (**3-4**) من فصل فحص نسبة لفات المحول (**TTR**) رقم (**4**). أو بواسطة الطريقة الآتية:

مثال: فلنفرض أننا أردنا فحص محول ذو مجموعة توصيل (**YNd5**) تقوم برسم المخطط الشُعاعي/المُتجهي (**Vector phasor diagram**) لهذه المجموعة كالآتي:



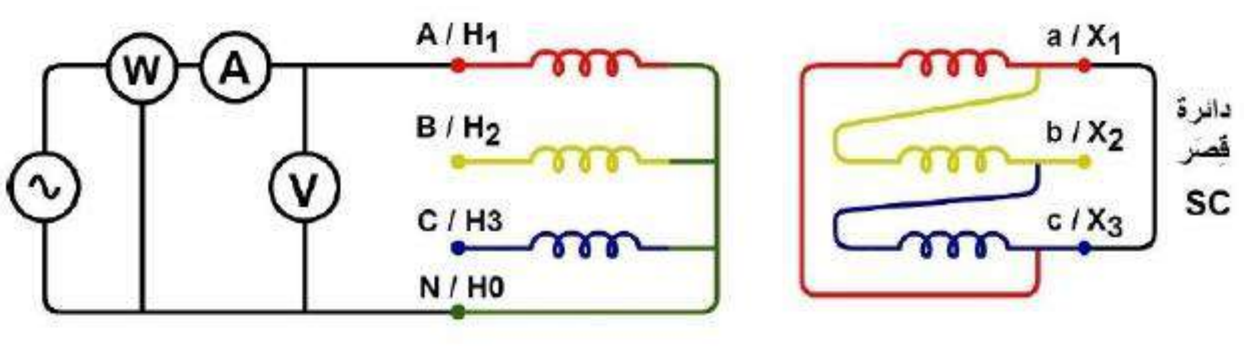
الشكل رقم (7-7)

ومن الشكل (**7-7**) يُمكن ملاحظة أن الأطراف الواجب تطبيق الفولتية عليها عند فحص الطور (**A**) هي (**H1 – H0**) و الأطراف الثانوية الواجب قَصرها هي (**X1 – X3**)، وفيما يخُص باقي الأطوار فإنها حسب الجدول (**7-2**).

الجدول رقم (7-2)

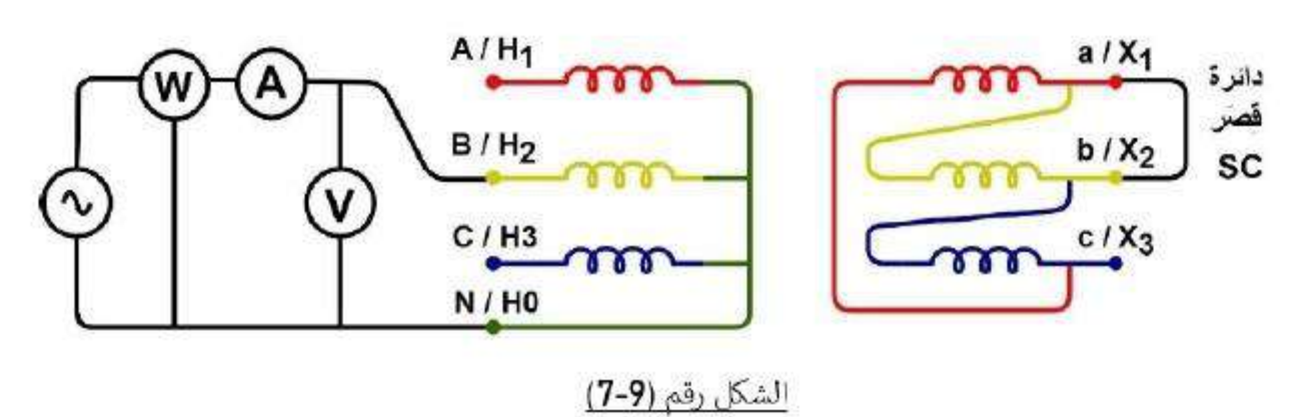
مجموعة التوصيل (YNd5)	
الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها	**الأطراف الواجب قصرها (SC)**
H1 – H0	X3 – X1
H2 – H0	X1 – X2
H3 – H0	X2 – X3

لتكون التوصيلة كما هو موضح بالشكل (7-8) والذي يُبين التوصيلة اللازمة لفحص الطور (A) مع مراعاة تطبيق دائرة القِصَر (Short circuit) على ملفات الفولتية المنخفضة ذات الصلة فقط.



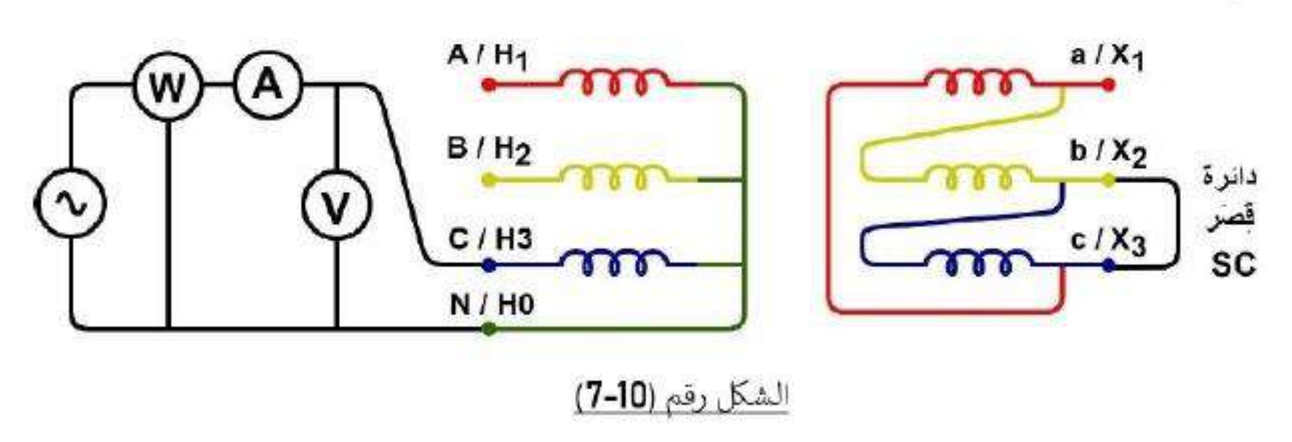
الشكل رقم (7-8)

ولفحص الطور (B) نقوم بإجراء التوصيلة الموضحة في الشكل (7-9) والذي يُبين التوصيلة اللازمة لفحص هذا الطور مع مراعاة تطبيق دائرة القِصَر (Short circuit) على ملفات الفولتية المنخفضة ذات الصلة فقط.



الشكل رقم (7-9)

ولفحص الطور (C) نقوم بإجراء التوصيلة الموضحة في الشكل (7-10) والذي يُبين التوصيلة اللازمة لفحص هذا الطور مع مراعاة تطبيق دائرة القِصَر (Short circuit) على ملفات الفولتية المنخفضة ذات الصلة فقط.



الشكل رقم (7-10)



ملحوظة (7-4) : يجب أن يتم توصيل الأسلاك المُستخدمة في قَصر الملفات بشكل مستقيم قدر الإمكان حتى لا تضيف مقاومة ومحاثة غير مرغوب بها إلى دائرة الفحص.

كما ويُمكن إيجاد الملحق (**7-3**) الذي يَضُم توصيلة هذا الفحص لبعض مجموعات التوصيل الأكثر شيوعاً.

- **الحسابات اللازمة:**

بعد القيام بالتوصيلة كما تم شرحه مُسبقاً وإجراء الفحص بهذا الأسلوب يُمكن إستخراج قيمة التيار و الفولتية وخسائر القدرة وإحتساب قيمة المُعاوقة (**Impedance - Z**) عبر تطبيق المعادلة (**7.3**) التالية:

$$Z_m = \frac{V_m}{I_m} \quad (7.3)$$

ومن ثم يتم إحتساب قيمة زاوية الطور (φ) بالإعتماد على قيمة خسائر القدرة بواسطة المعادلات التالية وذلك ليتنسى لنا حساب قيمة مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**).

$$P_m = V \,.\, I \,.\, Cos(\varphi) \quad (7.4)$$

$$\varphi = Cos^{-1}\left(\frac{P_m}{V_m \cdot I_m}\right) \quad (7.5)$$

ومن ثم يتم حساب قيم مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) وفقاً للمعادلة (**7.6**) التالية:

$$X_L = Z_m \,.\, Sin(\varphi) \quad (7.6)$$

وبعد ذلك يتم إحتساب (**X%**) كنسبة مئوية ليتم مقارنتها بالفحوصات السابقة وفقاً للمعادلة (**7.7**) التالية:

$$X\% = \frac{1}{10}\, X_L \frac{S_{1\Phi}}{V_{winding}^2} \quad (7.7)$$

حيث:

$S_{1\Phi}$: القدرة الظاهرية بالكيلوفولت أمبير (**Apparent power - kVA**) الإسمية للملف المُراد فحصه (**per phase**) وذلك بقسمة القدرة الكلية للمحول على **3** للمحولات ثلاثية الطور.

$V_{winding}$: الفولتية الإسمية للملفات المُراد فحصها بالكيلوفولت (**kV**)، بحيث يتم إستخدام فولتية الخط (**Line to Line**) للملفات الموصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**)، و فولتية الطور (**Phase to Neutral**) للملفات الموصولة على شكل نجمة (**Star - Y**).

مثال توضيحي:

إذا علمت أنه تم إجراء فحص مُفاعلة التسرُب بالأسلوب آحادي الطور (**Per Phase Leakage Reactance**) لمحول ذو المواصفات التالية (**3phase, Δ/Y, Base voltage 400kV, Base VA 200MVA**) وكانت قراءات الفولتية والتيار والقدرة وفقاً للجدول التالي.

الجدول رقم (**7-3**)

الطور	الفولتية (V)	التيار (I)	القدرة (W)
A	245	1.1	8
B	250	1.2	8.5
C	255	1.2	8.5

قم بإيجاد قيمة مُفاعلة التسرُب (**Leakage reactance**) بالأوم وأيضاً بالنسبة المئوية ($X\%$)

الحل:

إيجاد قيمة المُعاوقة (**Z**) بالأوم للطور (**A**)

$$Z_m = \frac{V_m}{I_m} = \frac{245}{1.1} = 222.73\ \Omega$$

حساب قيمة الزاوية (φ)

$$\varphi = Cos^{-1}\left(\frac{P_m}{V_m . I_m}\right) = Cos^{-1}\left(\frac{8}{245\ x\ 1.1}\right) = 88.3°$$

حساب قيمة مُفاعلة التسرُب (X_L) بالأوم

$$X_L = Z_m .Sin(\varphi) = 222.73\ x \sin(88.3°) = 222.6\ \Omega$$

حساب قيمة مُفاعلة التسرُب بالنسبة المئوية ($X_L\%$)

$$X\% = \frac{1}{10} X_L \frac{S_{rated}}{V_{rated}^2} = \frac{222.6}{10} x \frac{66{,}666}{400^2} = 9.3\%$$

وبنفس الطريقة يتم الحساب لباقي الأطوار.

ومن أوجه قصور هذا الأسلوب (**Per phase test**) أنه لا يُمكن تطبيقه على جميع مجموعات التوصيل (**Vector groups**) للمحولات، حيث يَلزم في هذا الفحص أن تكون نقطة التعادل (**Neutral point**) ظاهرة للملفات الموصولة على شكل نجمة (**Star – Y**) كما تم شرحه مسبقاً.

4.2 الأسلوب الثاني: الفحص ثلاثي الطور المُكافئ - Three phase equivalent test

في هذه الطريقة نقوم بتطبيق الفولتية المترددة (**AC**) على أطراف الخط (**line to line**) لأحد أطوار الملفات الإبتدائية ذات الفولتية المرتفعة مع مراعاة قَصر (**SC**) أطراف الملفات الثانوية ذات الفولتية المنخفضة جميعها ما عدا نقطة التعادل (**Neutral Point**) إن وجدت، وفي هذا الأسلوب يتم مقارنة

قيمة المُعاوقة المُقاسة (Impedance – Z%) بقيمة مُعاوقة القِصَر (SC Impedance) الناتجة من الفحص المَصنعي والمُثبتة على لوحة بيانات المحول (Name plate)، حيث أن الإختلاف الرئيسي بين الفحص بهذا الأسلوب والفحص المَصنعي أنه في هذا الأسلوب يتم إستخدام مصدر فولتية آحادي الطور.

كما وتَجدُر الإشارة إلى أنه يُمكن تطبيق هذا الفحص بهذا الأسلوب على المحولات التي لا يُمكن الوصول إلى نقطة التعادل (Neutral point) الخاصة بها مثل (Yy or Dy)، أما فيما يخُص المحولات التي يُمكن الوصول إلى نقطة التعادل (Neutral point) الخاصة بها فإنه يتم إجراء هذا الفحص بأسلوب الفحص آحادي الطور (Per phase test) كما تم شرحه سابقاً.

ومن أوجه قصور هذه الأسلوب مقارنةً بالأسلوب آحادي الطور (Per phase test)، أن قيمة مُعاوقة القِصَر المُقاسة (Impedance – Z%) تكون للثلاثة أطوار مجتمعة مما قد يُخفي وجود مشاكل على واحد أو أكثر من الأطوار.



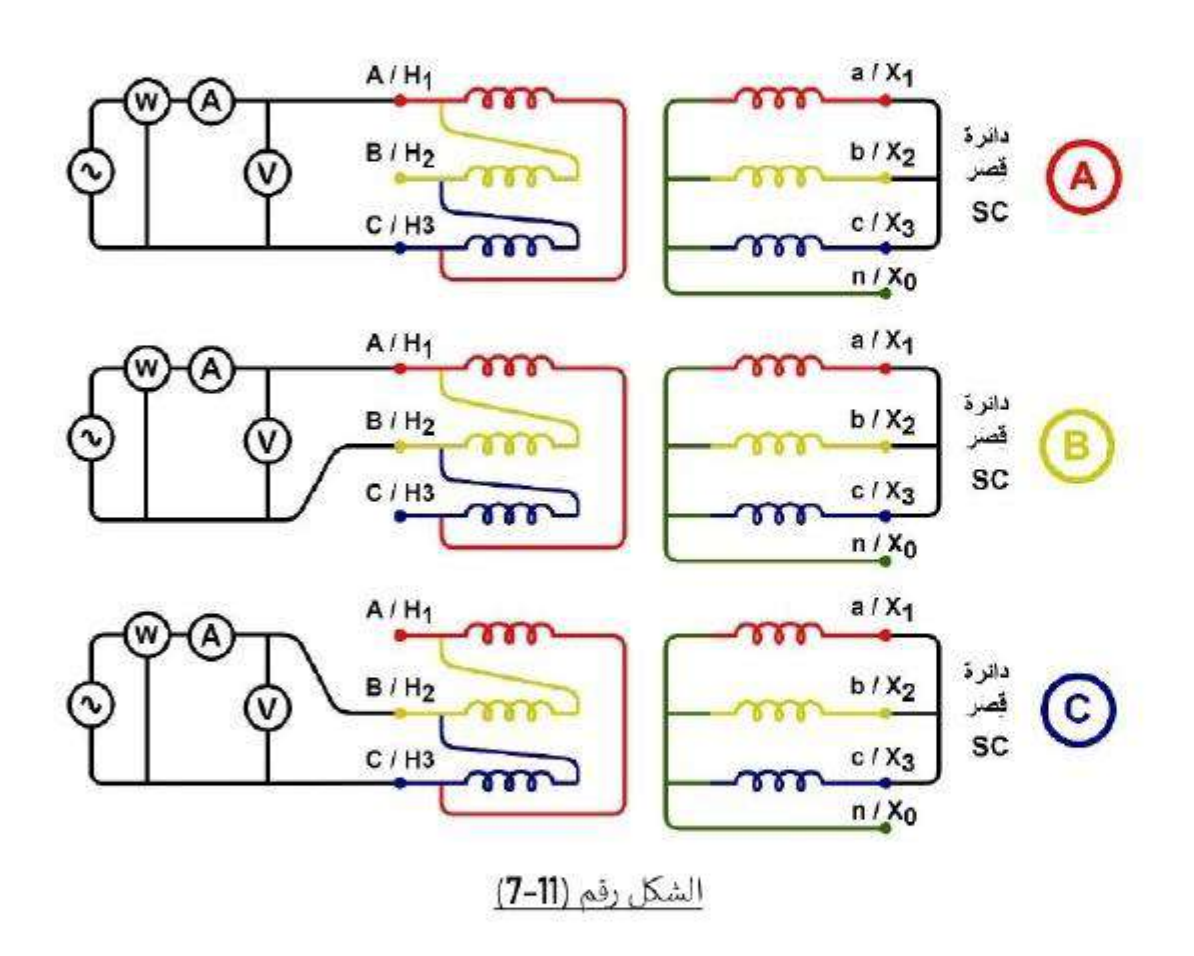
ملحوظة (7-5): يجب التأكد من وضعية مُغيّر الخطوة (Tap changer) عند إجراء الفحص بهذا الأسلوب بحيث يجب أن يكون على نفس الخطوة (Tap) التي تم إجراء فحص القِصَر المَصنعي عندها ليتسنى لنا مقارنة النتائج بشكل صحيح.

- **المعدات المستخدمة بالفحص:**

نفس المعدات في الفحص بالأسلوب آحادي الطور (Per phase test) سابق الذِكر.

- **توصيلة الفحص:**

تعتمد توصيلة الفحص على مجموعة التوصيل للمحول (Vector group)، حيث يجب تطبيق الفولتية على أطراف الخط (line to line) لأحد أطوار الملفات الإبتدائية ذات الفولتية المرتفعة وقَصر أطراف الملف الثانوي جميعها ما عدا نقطة التعادل (Neutral point) إن وجدت كما هو مُبين بالشكل (7-11) والذي يوضح توصيلة الفحص لمحول ذو مجموعة توصيل (Dyn1).



الشكل رقم (7-11)

الجدول رقم (7-4)

الطور تحت الفحص	أطراف الحقن	الأطراف المقصورة	الأطراف المفتوحة
A	H1 - H3	X1 - X2 - X3	H2
B	H2 - H1	X1 - X2 - X3	H3
C	H3 - H2	X1 - X2 - X3	H1

- الحسابات اللازمة:

بعد القيام بالتوصيلة كما تم شرحه مُسبقاً وإجراء الفحص بهذا الأسلوب يُمكن إستخراج قيمة التيار و الفولتية وخسائر القدرة وإحتساب قيمة المُعاوقة (**Impedance - Z**) عبر تطبيق المعادلة (**7.8**) التالية:

$$Z\% = \frac{1}{60}\left(\frac{E_1 + E_2 + E_3}{I}\right)\left(\frac{S_{3\phi}}{V_{L-L}^2}\right) \qquad (7.8)$$

أو

$$Z\% = \frac{1}{60}\sum Z_m \cdot \left(\frac{S_{3\phi}}{V_{L-L}^2}\right) \qquad (7.9)$$

حيث:

$S_{3\phi}$: القدرة الظاهرية الإسمية للملفات المفحوصة بالكيلوفولت أمبير (**kVA**).

V_{L-L} : فولتية الخط (**Line**) الإسمية للملفات المفحوصة بالكيلوفولت (**kV**).

$E_{1,2,3}$: مجموع فولتيات الفحص المُقاسة للأطوار الثلاثة.

I : قيمة التيار المُقاسة.

ΣZ_m : مجموع المُعاوقات للأطوار الثلاثة.



ملحوظة (7-6): كما ذُكر سابقاً أن المعاوقة (**Impedance –** Z) تتكون من مركبتين رئيسيتين الأولى مادية (R) و الثانية حثية (X_L)، وعادةً ما تكون قيمة المقاومة قليلة خاصة للمحولات ذات السعة الكبيرة (**High power transformer**) لذلك يُمكن إستخدام مصطلح المُعاوقة (**Impedance - Z**) للإشارة للمُفاعلة الحثية (X_L) أو كما تُسمى مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**).

مثال توضيحي:

إذا علمت أنه تم إجراء فحص مُفاعلة التسرُب بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (**Three Phase Equivalent test**) لمحول ذو المواصفات التالية (**3phase, Δ/Y, Base voltage 138kV, Base VA 30MVA**) وكانت قراءات الفحص وفقاً للجدول التالي.

الجدول رقم (**7-5**)

الطور	الفولتية (V)	التيار (I)	القدرة (W)	المعاوقة (Ω)
A	260	1.91	11	136.10
B	260	1.87	9.5	139.67
C	260	1.90	11	137.01

قم بإيجاد قيمة مُفاعلة التسرُب (**Leakage reactance**) بالنسبة المئوية ($X\%$) أو ($Z\%$) عوضاً عنها

$$Z\% = \frac{1}{60}\sum Z_m \cdot \left(\frac{S_{3\phi}}{V_{L-L}^2}\right)$$

$$Z\% = \frac{1}{60}\,(136.10 + 139.67 + 137.01)\,\frac{30{,}000}{138^2}$$

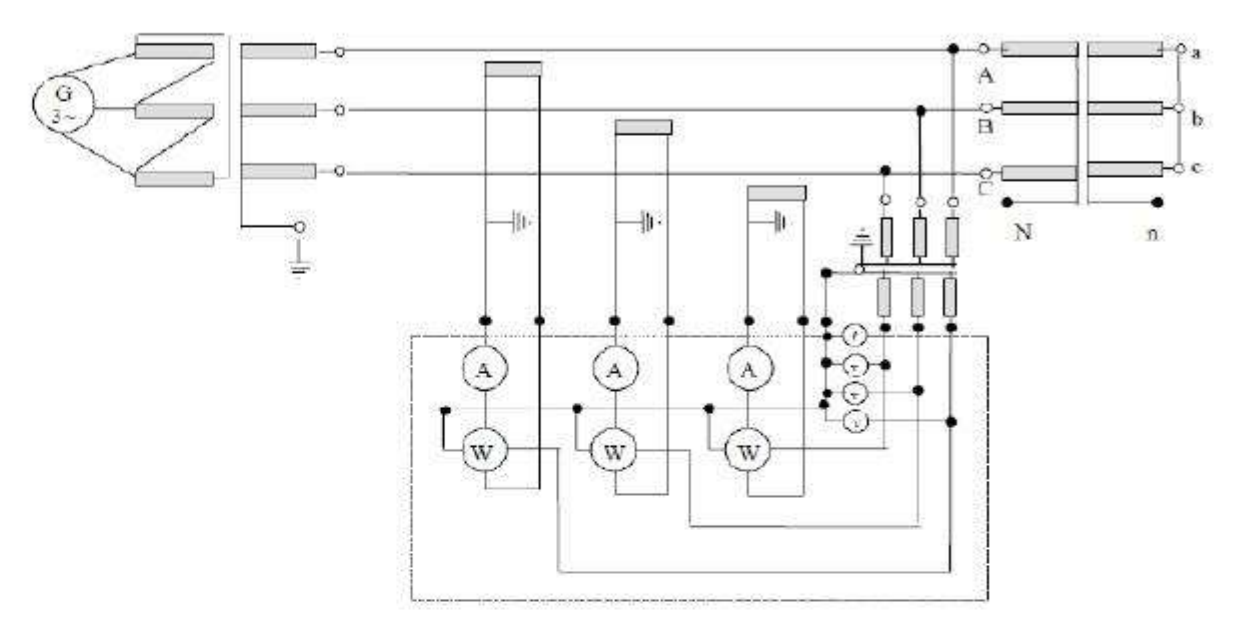
$$= 10.8\,\%$$

4.3 الأسلوب الثالث: فحص القِصَر المَصنعي - Factory Short Circuit test

عادةً ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص في حال تعذُّر إجراء الفحص بالأسلوب الأول آحادي الطور (**per phase test**) نتيجة لمجموعة التوصيل للمحول المُراد فحصه كعدم وجود نقطة تعادل (**Neutral point**) يُمكن الوصول إليها (ظاهرة)، و أيضاً في حال تعذُّر إجراء هذا الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (**Three phase equivalent test**) نتيجة لعدم توفر مصدر آحادي الطور مثلاً.

كما وتَجدُر الإشارة إلى أن إجراء الفحص بهذا الأسلوب لا يُعد من الفحوصات التشخيصية وإنما وجب الحديث عن هذا الأسلوب للتفرقه بينهُ وبين فحص مُفاعلة التسرُب المَوقعي (**Leakage Reactance test**)، حيث أنا هذا الفحص يتم إجراءه بتطبيق الفولتية على الملفات الإبتدائية (الثلاثة أطوار مُجتمعة دون نقطة التعادل) تصاعدياً حتى الوصول إلى التيار الإسمي في الملفات الإبتدائية عندها يتم قسمة الفولتية التي وصل عندها جهاز الحقن على الفولتية الإسمية للمحول مع مراعاة قَصر أطراف الملفات الثانوية (الثلاثة أطوار مجتمعة دون نقطة التعادل).

وأيضاً يُمكن إجراء هذا الفحص بالموقع بإستخدام نفس التوصيلة ولكن دون الوصول إلى قيمة التيار الإسمي ويسمى هذا الفحص بـ(**Short circuit test – reduced current**).



الشكل رقم (7-12)

الجدول (6-7) يُبين بعض أوجه الإختلاف بين فحص مُعاوقة القِصَر المَصنعي (Short circuit test) وفحص مُفاعلة التسرُب المَوْقعي (Leakage reactance test).

الجدول رقم (6-7)

فحص مُفاعلة التسرُب Leakage reactance test	فحص مُعاوقة القِصَر المصنعي Short circuit test	وجه الإختلاف
على طور واحد فقط	على الأطوار الثلاثة معاً	تطبيق الفولتية
تيار قليل (2 - 10 A)	التيار الإسمي للمحول	تيار الفحص
فولتية قليلة (50 – 300 V)	فولتية عالية قد تصل إلى **20%** من الفولتية الإسمية للمحول	فولتية الفحص
المُفاعلة $X\%$ خسائر حمل I^2R منخفضة بسبب تيار الفحص القليل	المُعاوقة $Z\%$ خسائر حمل I^2R مرتفعة نتيجة لمرور التيار الإسمي	القيمة المُقاسة

5. خطوات الفحص

بعد التعرُّف على فلسفة الفحص وتوصيلاته وطريقة إحتساب قيمة مُفاعلة التسرُب، يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (**Lock-out Tag-out LOTO**).

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خِشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمَّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing]** و المعهد الوطني الأمريكي للمعايير **[ANSI National Electrical Safety Code]** و مُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية **[OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]**.

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**) وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) وكذلك الحال بنقطة التعادل للمحول (**Neutral point**) إن وجدت.

5.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (**Trapped Charges**) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قِصَر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى التأكد من تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص.



تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (**Earthing Dis-connector**) أو المتنقلة (**Portable**) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines - OHL**) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.

5.6 التأكد من أن خزان المحول والقلب الحديدي موصول بالأرض بشكل مباشر (**Solidly grounded**).

5.7 تسجيل درجة الحرارة ونسبة الرطوبة.

5.8 التأكد من وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) بحيث تكون عند الخطوة التشغيلية المرجعيّة للمحول أي التي يكون عندها مُغيّر الخطوة أثناء العمل الطبيعي للمحول وهذا في حال كان الفحص بالأسلوب آحادي الطور (**Per phase test**)، أما في حال كان الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (**Three phase equivalent test**) فإنه يجب إختيار الخطوة (**Tap**) لتكون نفسها للفحص السابق أو المَصنعي ليتسنى لنا مقارنة النتائج بشكل صحيح.

5.9 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص وفقاً لأسلوب الفحص المُراد إجراؤه وكما هو موضح في فقرة أساليب الفحص سابقة الذِكر بالإضافة للرجوع إلى الملحق (**7-3**) لمجموعات التوصيل الأكثر شيوعاً أو الملحق (**4-3**) من فصل فحص نسبة لفات المحول (**TTR**) رقم (**4**) من هذا الكتاب.

5.10 تطبيق فولتية مترددة (**AC**) على الملفات الإبتدائية للحصول على تيار محصور بين (**1 – 10A**) أمبير ومقدار هبوط بالفولتية من (**30 – 100V**) فولت، وعادةً ما يتم إعتماد تيار فحص مقداره (**1A**) أمبير مع التأكد من أن مقدار الهبوط بالفولتية محصور بين (**30 – 100V**) وإن لم يكن كذلك يُمكن زيادة مقدار تيار الفحص للحصول على قيمة الفولتية المناسبة، بعد ذلك نقوم بقياس الفولتية والتيار المتولد بالإضافة إلى خسائر القدرة ومنه يتم إحتساب مُفاعلة التسرب كما تم شرحه مسبقاً في فقرة أساليب الفحص.

5.11 كما ويُمكن إجراء هذا الفحص بواسطة أجهزة الفحص الحديثة كما هو مبين في الملحق رقم (**7-1**) الخاص بجهاز الفحص (**TESTRANO 600**) المُصنّع بواسطة شركة (**OMICRON**).

6. تصحيح القيمة المُقاسة

عند إجراء هذا الفحص بالأسلوب آحادي الطور (**Per phase test**) فإنه لا حاجة لتصحيح القيمة المُقاسة تبعاً لدرجة الحرارة، وذلك لأن الفحص على الأطوار الثلاثة يكون تقريباً عند نفس درجة الحرارة مما يُتيح مقارنة نتيجة الفحص دون الحاجة للتصحيح، أما في حال إجراء هذا الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (**Three phase equivalent test**) ولغايات مقارنته بالنتيجة المُثبته على لوحة بيانات المحول (**Nameplate**) فإنه لا بُد من تصحيح القيمة المُقاسة تبعاً لدرجة الحرارة وذلك بواسطة المعادلة الخاصة بذلك والواردة في فقرة تصحيح القيمة المُقاسة من فصل فحص مقاومة الملفات (**WRM**) رقم (**3**) من هذه الكتاب.

7. تحليل نتائج الفحص

يوجد عدة طرق لتحليل نتيجة فحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) حسب أسلوب الفحص المُتبع ووفقاً لما ورد في مِعيار معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.152-2013]** بالإضافة لما ورد في الكتاب **[Jill C. Duplessis, Electric Field Tests for the Life Management of Transformers]**:

7.1 الفحص بالأسلوب آحادي الطور (Per phase test):

عند إجراء الفحص بهذا الأسلوب فإنه يجب مقارنة قيمة مُفاعلة التسرُب المُقاسة لكل طور بالأوم (**Ω**) مع قيمة مُفاعلة التسرُب المتوسطة (**Average**) للأطوار الثلاثة بالأوم (**Ω**) على أن لا تزيد نسبة التباين عن (**3%**) بالمئة، وعادة ما تكون قيمة التباين لأغلب المحولات السليمة أقل من (**1%**) بالمئة.

7.2 الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (Three phase equivalent test):

في حال كان المحول جديد فإنه يتم مقارنة قيمة مُعاوقة القِصَر المُقاسة بالقيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول (**Nameplate**) على أن لا تتجاوز قيمة التباين عن (**3%**) بالمئة، وفي حال مقارنة نتيجة الفحص بنتائج فحوصات سابقة فإن نسبة التباين يجب أن تكون أقل من (**2%**) بالمئة.

8. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل عند إجراء هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

8.1 مساحة المقطع العرضي للأسلاك المُستخدمة في قَصر الملفات (Winding Short circuit wires cross-section)

كما تم شرحة سابقاً فإن قيمة المُعاوقة (Z) تتكون من مقاومة (R) ومُفاعلة حثية (X_L) أو كما تُسمى بمُفاعلة التسرُب، و في حال إستخدام أسلاك ذات مساحة مقطع صغيرة هذا بدوره سيُضيف مقاومة غير مرغوب بها إلى دائرة الفحص مما يؤثر على قيمة المُعاوقة المُقاسة. لذلك يُنصح بإستخدام أسلاك ذات مساحة مقطع عرضي (**Cross-section**) مساوٍ أو أكبر من (**1WAG**) أي ما يُعادل (**42.4** mm^2) حسب معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.152-2013]** كما ذُكر سابقاً.

وكذلك الحال إذا كانت الأسلاك المُستخدمة في قَصر (**SC**) الملفات الثانوية للمحول طويلة ومرتبة بشكل حلقي فإنها ستضيف محاثة غير مرغوب بها إلى دائرة الفحص من شأنها التأثير على نتيجة الفحص أيضاً. لذلك يُنصح بإستخدام أسلاك ذات مساحة مقطع عرضي مناسبة بالإضافة إلى أن تكون أقصر ما يكون، وفي حال إستخدام أسلاك طويله نوعاً ما يجب ترتيبها بشكل طولي لا حلقي للأسباب سابقة الذكر.

8.2 وضعية مُغيّر الخطوة (Tap changer position)

عند تحليل النتائج ومقارنة نتيجة الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ (**Three phase equivalent test**) بالقيمة المُثبتة على لوحة بيانات المحول (**Nameplate**) فإنه يجب ملاحظة وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) أثناء إجراء الفحص بحيث تكون نفس الوضعيّة (**Same tap position**) التي تم إجراء الفحص عليها في المصنع والمُثبتة على لوحة بيانات المحول (**Name plate**) لما لها من تأثير على نتيجة الفحص.

9. فحوصات إضافية داعِمة

تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص وتحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول والذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص مُفاعلة التسرُب وكانت نتائج الفحص غير مُرضية بعد تحليلها وفقاً لما تم شرحه سابقاً، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تجنُّب الأمور التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفي حال الحصول على نتيجة أُخرى غير مُرضية لا يُنصح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأُخرى للتأكد من وجود هذه الأعطال قبل البدء بالإجراءات التصحيحية ومنها كالآتي:

- **فحص الفولتية المنخفضة النبضي/الدفعي - (LVI) Low Voltage Impulse**
  وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول.
- **فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (SFRA)**
  وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول، ولكن هذا الفحص لا يُعنى بتشوّه الملفات فقط وإنما ينظر على نطاق واسع من الخصائص الميكانيكية للمحول لذلك فهو غير حساس لتشوّه الملفات بقدر فحص مُفاعلة التسرُب.
- فحص المواسعة (**Overall Capacitance**)
  وذلك للكشف أيضاً عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وملفات المحول، ولكن هنالك عدة عوامل من شأنها التأثير على قيمة المواسعة مثل درجة الحرارة، بالإضافة إلى أن حساسية فحص المواسعة ليست كبيرة أي أن تشوّه أو إزاحة كبيرة في الملفات قد لا تظهر في فحص المواسعة أو قد تعطي تغيُّر طفيف على قيمة المواسعة المُقاسة.

الخلاصة: يُمكن القول أن فحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) من أكثر الفحوصات حساسية لتشوّه أو إزاحة ملفات المحول.

الملحق (1-7)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص مُفاعلة التسرُب بإستخدام جهاز TESTRANO 600 by OMICRON





الشكل رقم (1-1-7)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(TESTRANO600 Brochure)
  - فولتية المدخل الإسمية : **100/240 V, 50/60 Hz**
  - فولتية المدخل المسموح بها : **85-264 V, 45-65 Hz**
  - نطاق تيار/فولتية المخرج : حسب الجدول التالي.

عدد الأطوار	نطاق الفولتية (AC)	التيار الأقصى (AC)
ثلاثي الأطوار	0 ... 230 V	100 mA
	0 ... 80 V	16 A
	0 ... 40 V	33 A
آحادي الطور	0 ... 240 V	16 A
	0 ... 120 V	33 A

• دقة النطاق المُقاس : حسب الجدول التالي.

النطاق	دقة القراءات
1:1 10	0.03% rd + 0.043% range
1:10 100	0.027% rd + 0.043% range
1:100 1000	0.027% rd + 0.043% range
1:1000 10000	0.027% rd + 0.043% range

• البيئة التشغيلية المحيطة : 14° F to 131° F (-10° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
• البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
• أبعاد الجهاز : 580 x 386 x 229 mm
• وزن الجهاز : 45.5 lb. (20.6 kg), with display

• **خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:**

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**5.1** إلى **5.8**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص مُفاعلة التسرُب.
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية وأن الملفات تم تفريغها من الشحنات المخزنة تماماً.
4. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير متسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرف على أجزاء جهاز الفحص من شاشة ومنافذ وأزرار ومفاتيح تحكم ولمبات إشارة كما هو مُبين بالأشكال (**7-1-2&3**).



الشكل رقم (7-1-2)



الشكل رقم (7-1-3)

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
   - **7.1** التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
   - **7.2** التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
   - **7.3** التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
   - **7.4** التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
   - **7.5** وضع حواجز حول منطقة الفحص وشواخص تفيد بوجود فحص ذو فولتية وتيار خَطِر.
8. إحضار جهاز الفحص (**TESTRANO 600**) إلى الموقع مع مراعاة وضع الجهاز بالظل وعدم تعريضه لأشعة الشمس المباشرة لوقت طويل، حيث أن الحرارة التشغيلية للجهاز يجب ألا تزيد عن (**55°**) درجة مئوية، وفي حال كانت الحرارة أكثر من (**40°**) درجة مئوية يجب الرجوع للكتيب التفصيلي (**Manual**) الخاص بجهاز الفحص لمعرفة التيار الأقصى الذي يُمكن حقنه من خلال الجهاز، وكذلك مراعاة جفاف أجزاء الجهاز جميعها قبل تشغيله.
9. التأكد من أن مفتاح التشغيل الخاص بجهاز الفحص رقم (**3**) في الشكل (**7-1-2**) على وضعية (**OFF - O**) الموضحة على المفتاح.
10. التأكد من ضغط زر إيقاف الفحص في حالات الطوارئ (**Emergency Push Button**) رقم (**15**) في الشكل (**7-1-3**).
11. وصل جهاز الفحص بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض رقم (**1**) في الشكل (**7-1-2**) بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنعة أو بواسطة كيبل تأريض لا يقل مساحة مقطعه العرضي عن ($6\,mm^2$) مليمتر مُربع أقرب ما يُمكن على مُشغل الجهاز لتقليل معاوقة التأريض (**Impedance**) قدر المستطاع.
12. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو مُعاوقة قليلة (**Low Impedance**).
13. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمُعاوقة قليلة (**Low Impedance**).

14. توصيل جهاز الفحص بمصدر الطاقة الكهربائية عبر المنفذ رقم **(2)** في الشكل **(7-1-2)** بحيث يتم وصل كيبل الطاقة بجهاز الفحص أولاً ومن ثم بالمصدر الكهربائي.

15. تشغيل الجهاز بواسطة مفتاح التشغيل رقم **(3)** في الشكل **(7-1-2)** عن طريق تغير وضعيته من **(O)** لـ**(I)** الموضحة على المفتاح.

16. ملاحظة إنار كل من لمبة الإشارة خضراء اللون رقم **(18)** والحلقة الزرقاء حول زر بدء/إيقاف الفحص **(Start/Stop)** في الشكل **(7-1-3)** وهذا يعني أن الجهاز لا يحقن تيار ولا فولتية كما يظهر في الشكل **(7-1-4)**.



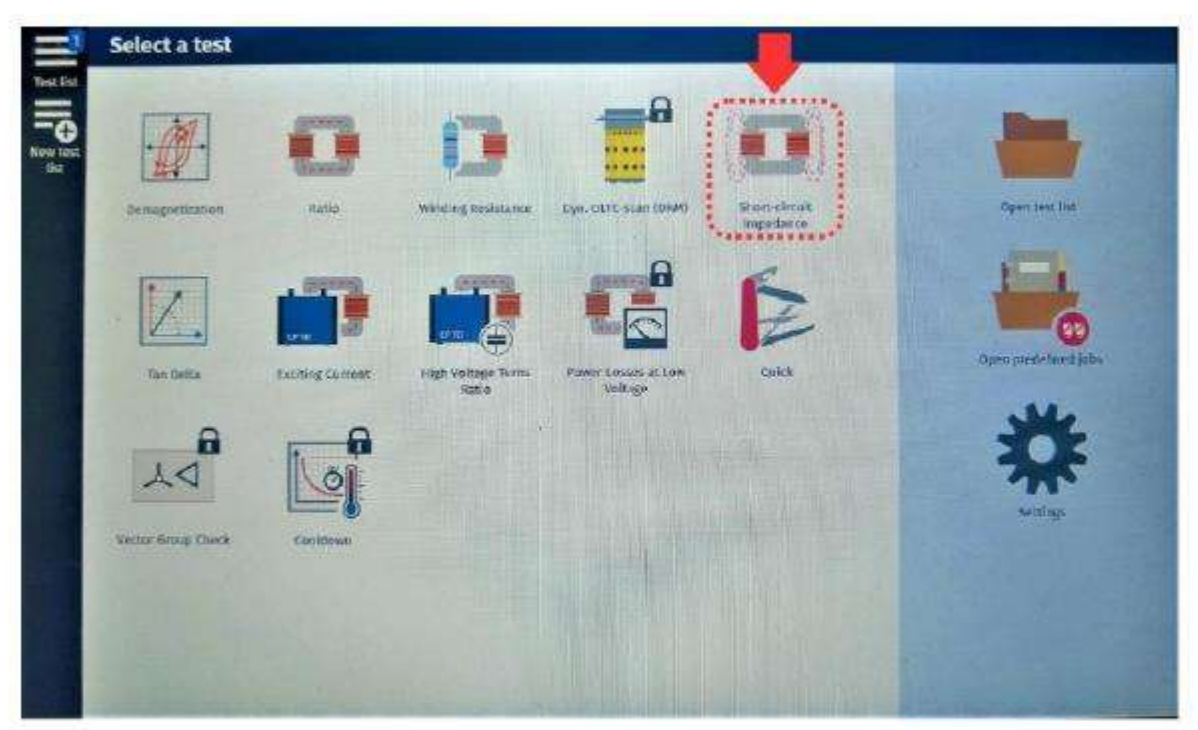
الشكل رقم **(7-1-4)**

17. في حال كان هنالك مشكلة ما في التأريض سوف تظهر رسالة على الشاشة تُفيد بذلك وستظهر العلامة التالية أسفل الشاشة ، وفي حال عدم إنارة أي ضوء تحذيري أو ظهور أية رسائل تحذيرية على الشاشة فإن ذلك يعني أن الأرضي والجهاز سليمين والجهاز مُهيأ لعمل باقي التوصيلات والبدء بالفحص.



ملحوظة: يُتيح جهاز الفحص **(TESTRANO 600)** إمكانية ضبط إعدادات الفحص و إجراؤه بطريقتين، الطريقة الأولى بواسطة شاشة اللمس **(Touch Control)** مباشرة، و الطريقة الثانية بواسطة توصيل جهاز الحاسوب بجهاز الفحص **(TESTRANO 600)** و القيام بالفحص عبر برنامج **(Primary Test Manger - PTM)**. حيث سيتم التطرُق للطريقة الأولى فقط في هذا الملحق.

18. إختيار فحص مُفاعلة التسرُب **(Leakage Reactance)** أو مُعاوقة القِصَر **(Short Circuit Impedance)** من القائمة الرئيسية الظاهرة على شاشة اللمس **(Touch Control)** والمُبينة في الشكل **(7-1-5)**، حيث أن إسم الفحص يعتمد على المِعيار المُعتمد لجهاز الفحص والذي يُمكن تحديده ضمن إعدادات جهاز الفحص فبالرجوع إلى معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **(IEEE)** فإن هذا الفحص يُسمى فحص مُفاعلة التسرُب **(Leakage Reactance)** أما فيما يخُص اللجنة الكهروتقنية الدولية **(IEC)** فإن هذا الفحص يُسمى فحص مُعاوقة القِصَر **(Short circuit impedance)**.



الشكل رقم (7-1-5)

19. بعد ذلك تظهر الشاشة المبينة في الشكل (**7-1-6**) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (**Settings**). نقوم بعمل قفل (**Software Lock**) للحفاظ على الوضعية الآمنة أثناء عمل التوصيلة المناسبة للفحص، وذلك بالضغط على زر القفل الظاهر أسفل الشاشة 🔒 كما هو مُبين في الشكل (**7-1-6**).



الشكل رقم (7-1-6)

20. بعد الضغط على زر القفل (**Lock**) المُبين في الشكل السابق تظهر النافذة الفرعية المُبينة في الشكل (**7-1-7**)، ثم نقوم بإدخال كود رباعي والضغط على كلمة (**Lock**). وبذلك نكون قد وصلنا للوضعية الآمنة للجهاز.



الشكل رقم (**7-1-7**)

21. توصيل الكوابل الظاهرة في الشكل (**7-1-8**) بجهاز الفحص عبر المنافذ المُبينة في الشكل (**7-1-2**) كالآتي:

21.1 توصيل كيبل الفولتية المرتفعة (الأحمر) بالمنفذ رقم (**4**) المُبين في الشكل (**7-1-2**).

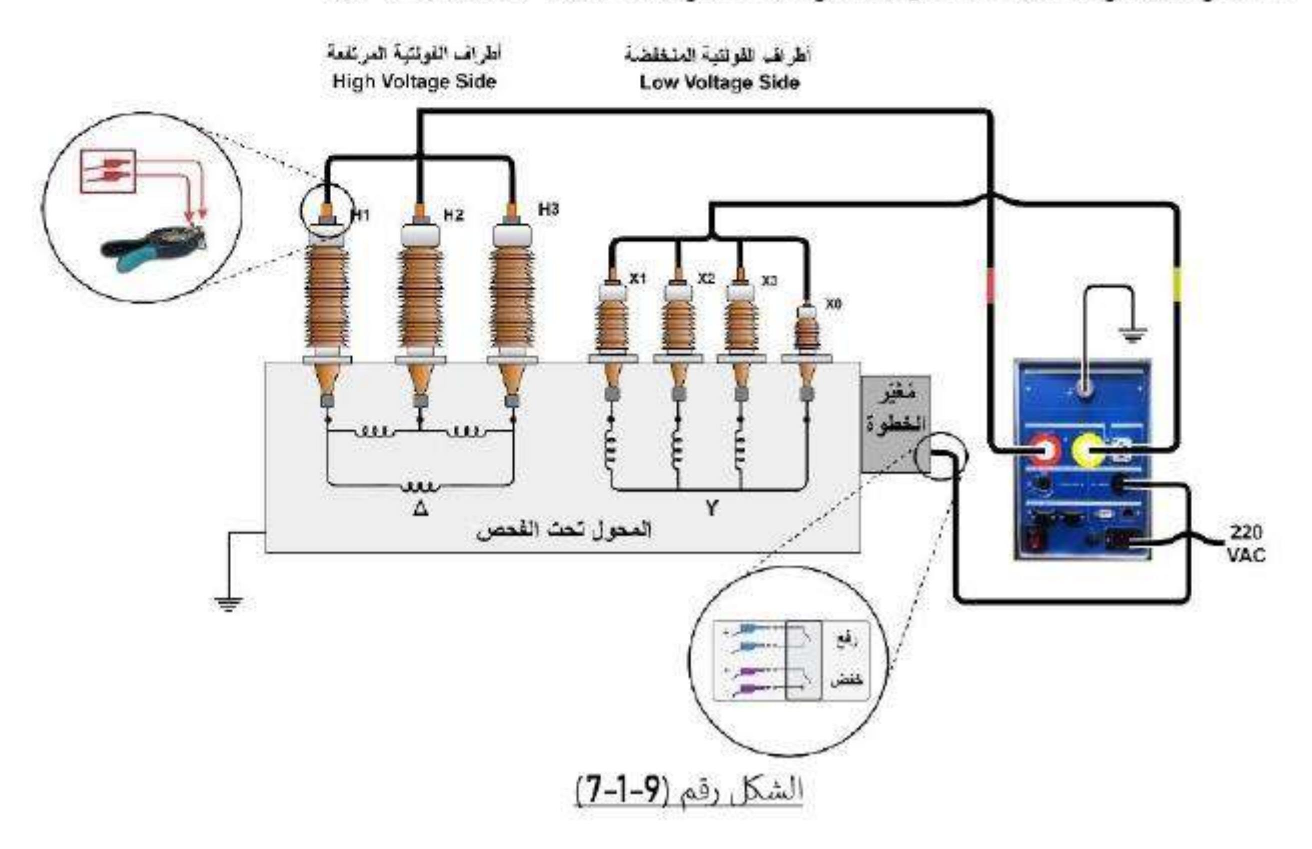
21.2 توصيل كيبل الفولتية المنخفضة (الأصفر) بالمنفذ رقم (**9**) المُبين في الشكل (**7-1-2**).

21.3 توصيل كيبل مُغيّر الخطوة (الأسود) بالمنفذ رقم (**7**) المُبين في الشكل (**7-1-2**).



الشكل رقم (**7-1-8**)

22. توصيل كوابل جهاز الفحص بالمحول وفقاً للتوصيلة المُبينة بالشكل (7-1-9).

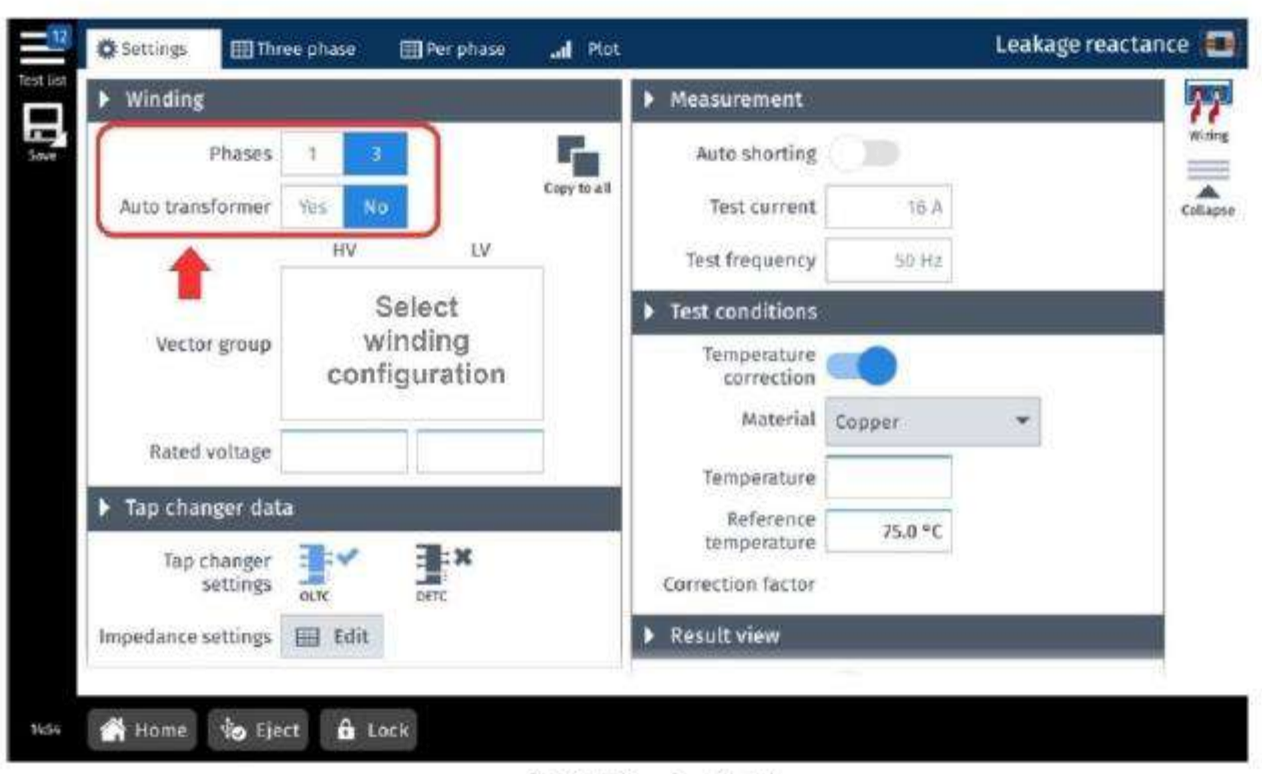


الشكل رقم (7-1-9)

23. إرجاع الطاقة الكهربائية لمُغيّر الخطوة (Tap-changer) فيما إذا كانت مفصولة.
24. التأكد من نصب حواجز السلامة بالإضافة للشواخص التحذيرية.
25. بعد الإنتهاء من التوصيلة كاملة، نقوم بتحرير (Release) زر إيقاف الفحص في حالة الطوارئ (Emergency Stop Button).

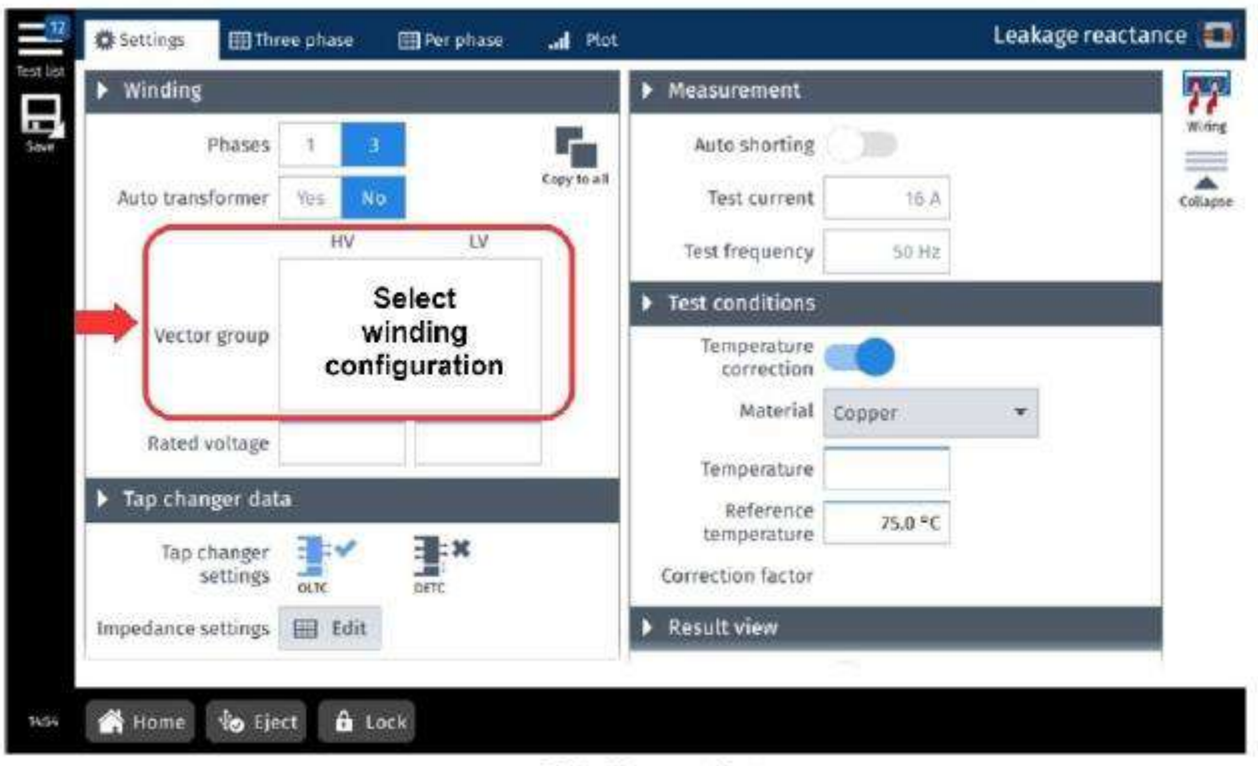
26. الرجوع لشاشة اللمس وإزالة قفل الشاشة عبر إدخال الكود الرباعي والضغط على أيقونة الإدخال ↵ ويُمكن كذلك إزالة قفل الشاشة عبر إطفاء الجهاز وتشغيله مرة أخرى.

27. من الشاشة الظاهرة في الشكل (7-1-10) والتي تكون بالبداية على نافذة التبويب إعدادات (Settings) يتم تحديد عدد أطوار المحول المُراد فحصه بالضغط على الرقم (3) أي أنه ثلاثي الطور (3 phase transformer)، ثم يتم الضغط على (No) بجانب المحول التلقائي (Auto Transformer).



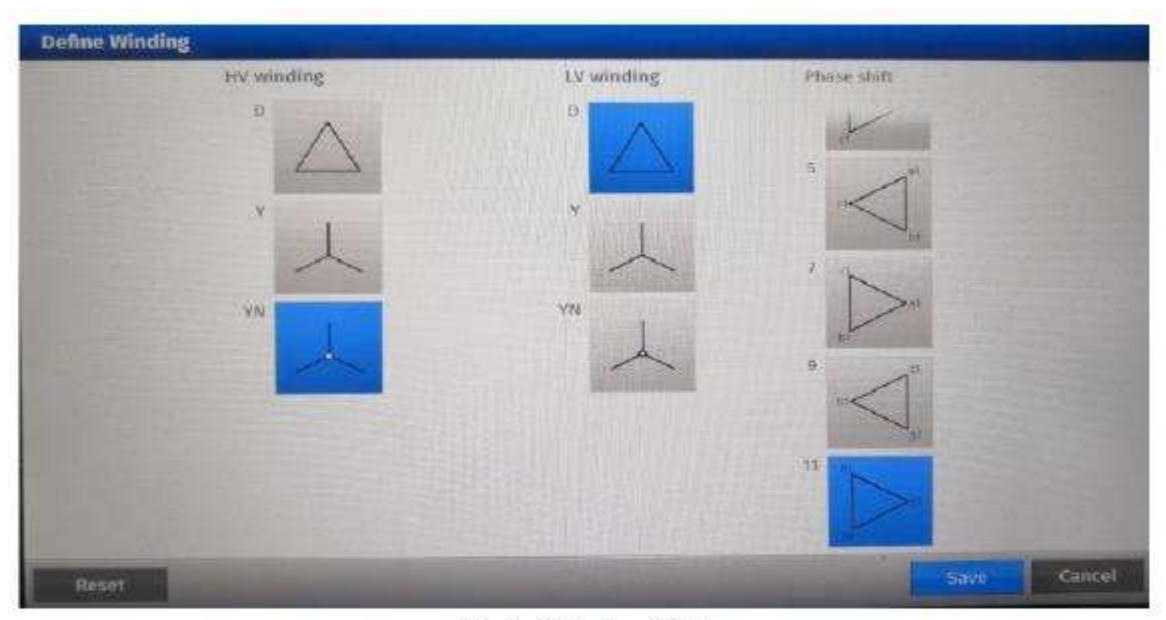
الشكل رقم (7-1-10)

28. نقوم بتحديد مجموعة التوصيل (Vector group) الخاص بالمحول المُراد فحصه وذلك بالضغط على جملة إختر مجموعة التوصيل (Select winding configuration) الظاهرة على الشاشة والمُبينة في الشكل (7-1-11) لتظهر لنا شاشة تحديد مجموعة التوصيل.



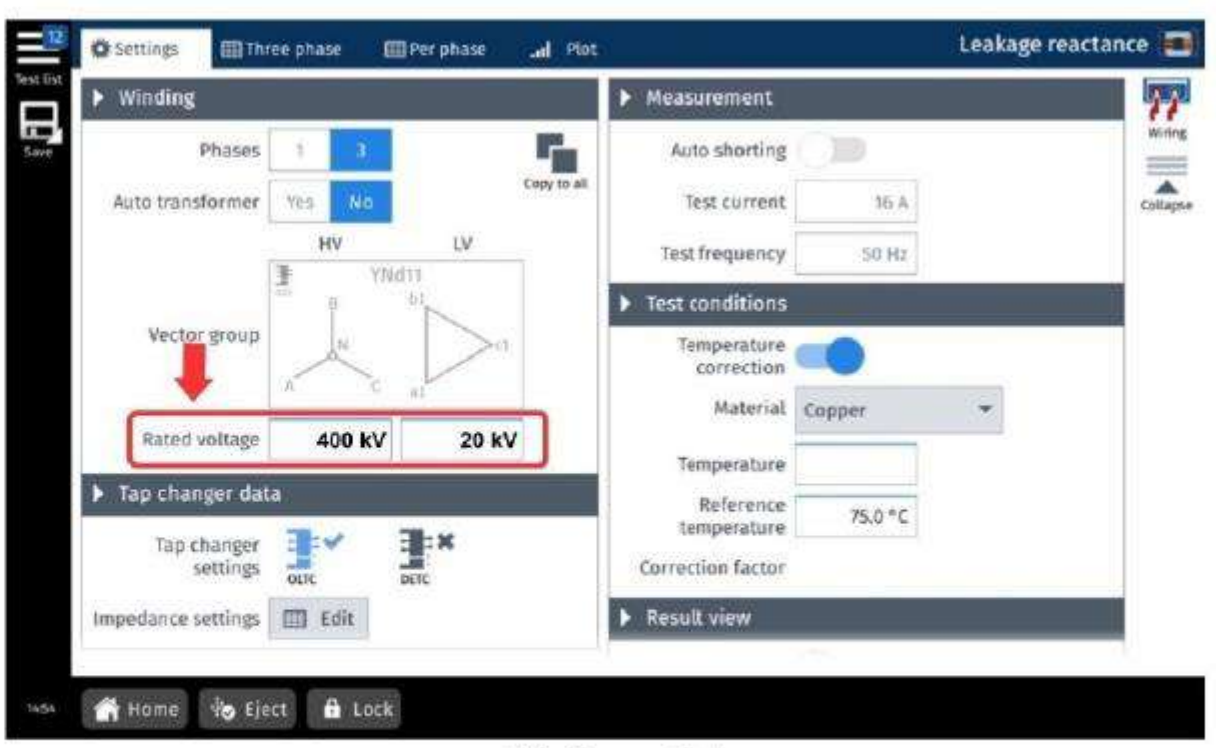
الشكل رقم (7-1-11)

29. من شاشة تحديد مجموعة التوصيل الظاهرة في الشكل (7-1-12) نقوم بتحديد مجموعة التوصيل الخاصة بالمحول المُراد فحصه، حيث تم تحديد المجموعة (YNd11) كمثال ثم الضغط على زر حفظ (Save).



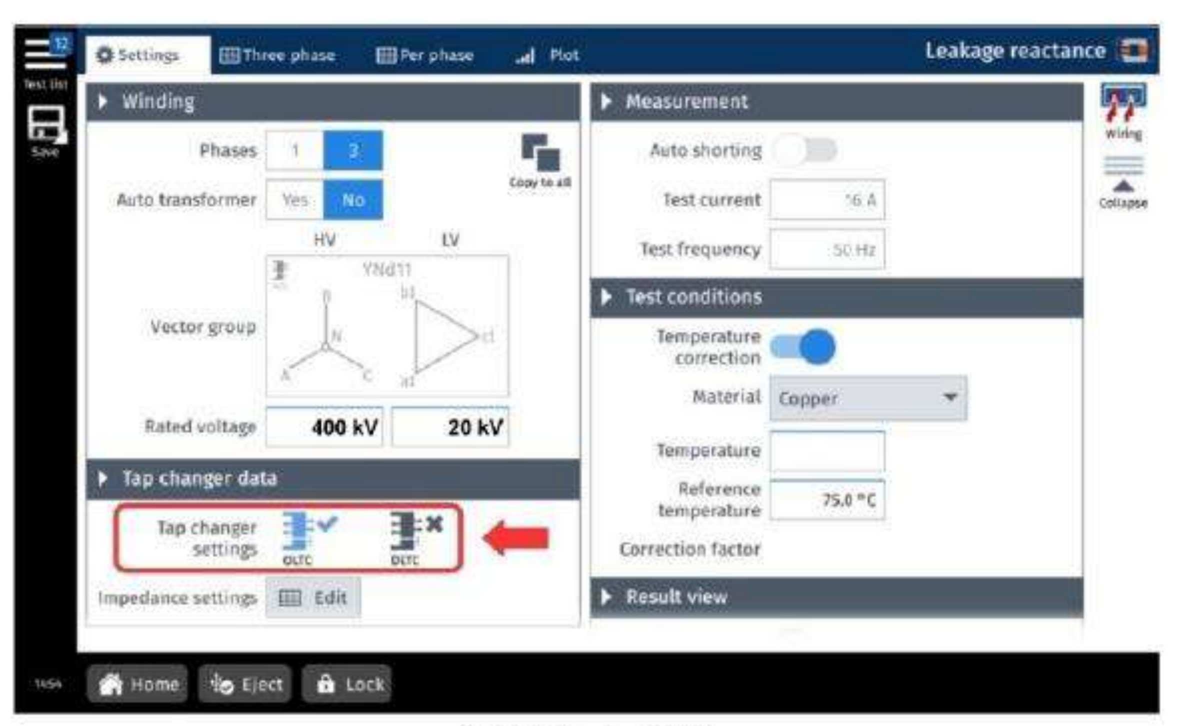
الشكل رقم (7-4-12)

30. تحديد الفولتية الإسمية للمحول المُراد فحصه وذلك بإدخال قيمة هذه الفولتية بالمكان المخصص لها كما هو مُبين بالشكل (7-1-13).



الشكل رقم (7-1-13)

31. تحديد نوع مُغيّر الخطوة (**Tap Changer**) فيما إذا كان (**OLTC** أو **DETC**)، وفي حالتنا هذه نقوم بإختيار (**OLTC**) وذلك بالضغط عليها كما هو مُبين بالشكل (**7-1-14**) لتظهر لنا النافذة المبينة في الشكل (**7-1-15**) والتي من خلالها يُمكن إدخال المعلومات الخاصة بمُغيّر الخطوة (**tap changer**) ومن ثم الضغط على زر حفظ (**Save**).



الشكل رقم (7-1-14)

Define Tap Changer

OLTC

DETC

Available: No | Yes

Position: HV | LV

Tap scheme: 1...33

No. of taps: 5

Voltage table | Middle | First/Middle/Last

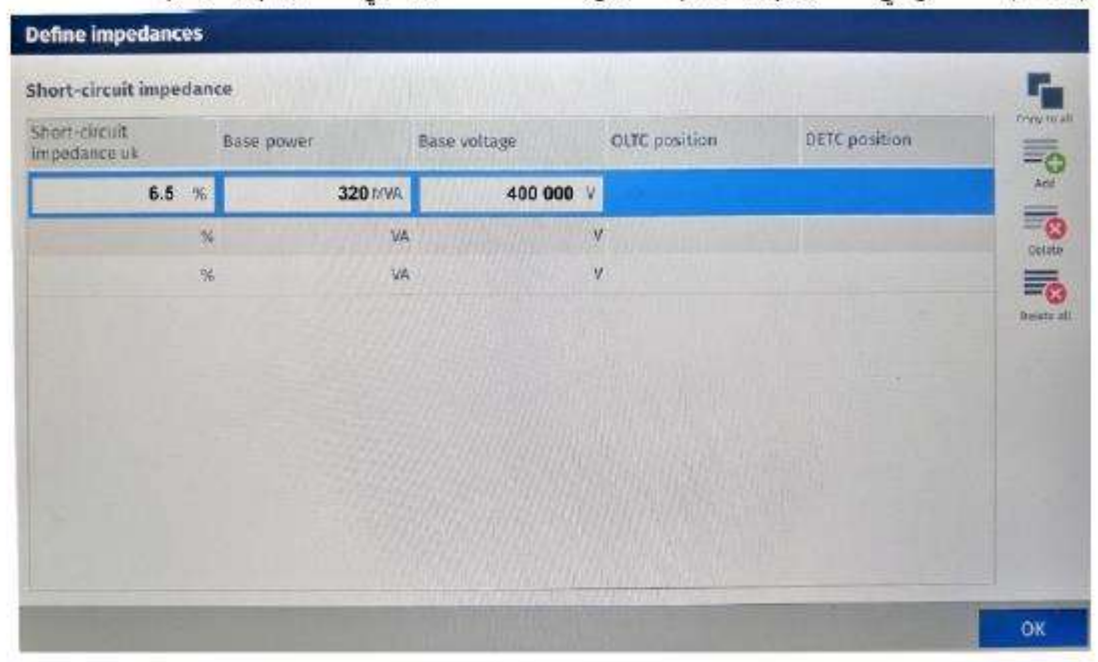
Calculate

Tap	Voltage
1	420 kV
2	410 kV
3	400 kV
4	390 kV
5	380 kV

Save | Cancel

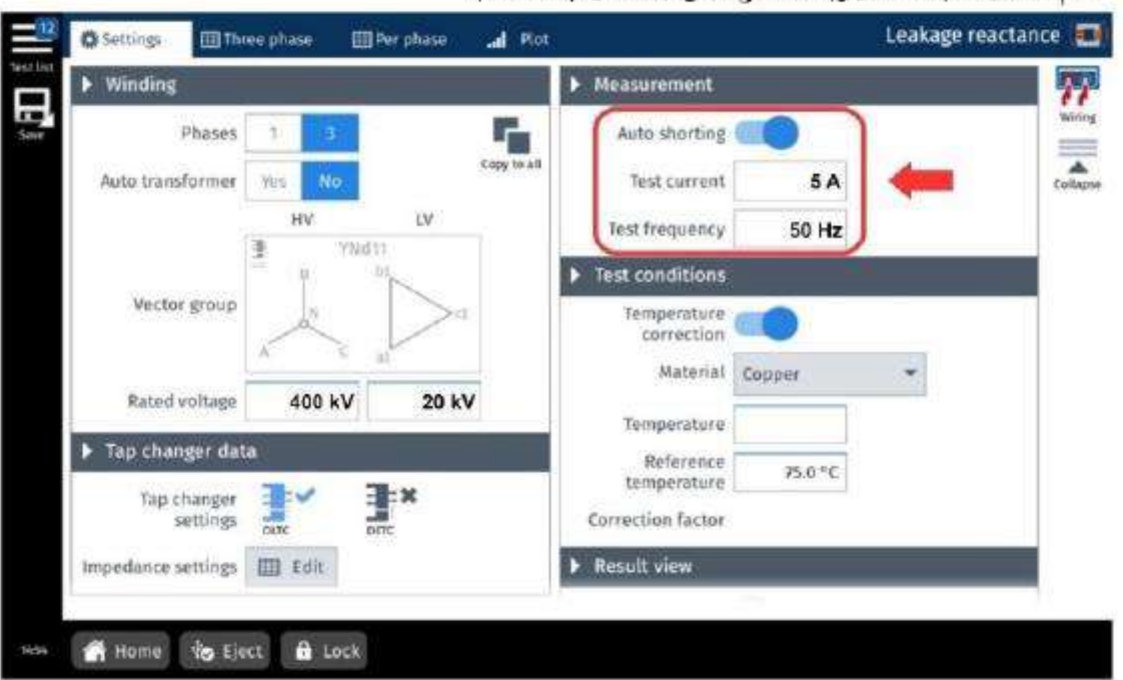
الشكل رقم (7-1-15)

32. إدراج قيمة مُعاوقة القِصَر (**Short circuit Impedance**) بالإضافة لقيمة القدرة الظاهرية للمحول وفولتية الخطوة (**Tap Voltage**) ورقم الخطوة (**Tap number**) وذلك بالضغط على كلمة تعديل (**EDIT**) الظاهرة في الشكل (**7-1-14**) لتظهر لنا النافذة المبينة في الشكل (**7-1-16**).



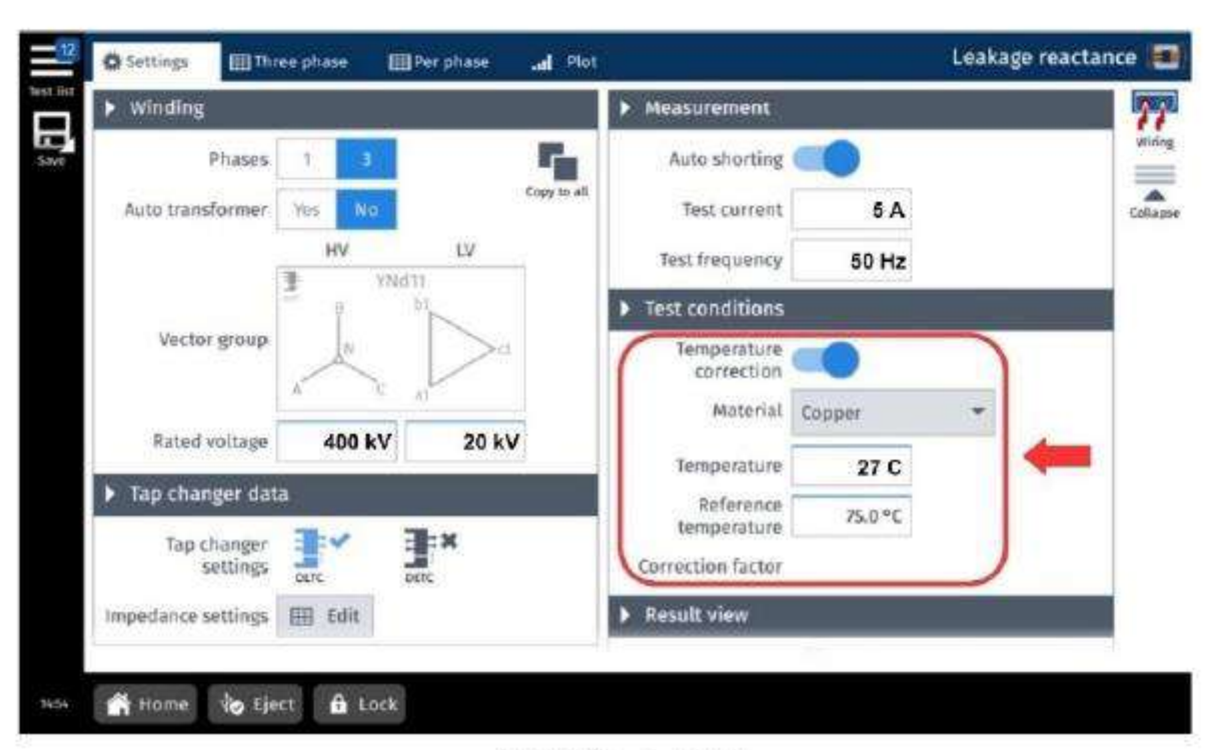
الشكل رقم (7-1-16)

33. تحديد آلية إجراء دائرة قِصَر لملفات المحول ذات الفولتية المُنخفضة بحيث يُمكن إجراؤها بشكل يدوي (**Manual**) أو تلقائي (**Auto shorting**)، ويُفضَل إجراء دائرة القِصَر بشكل تلقائي (**Auto**) وذلك بتفعيل الشريط بجانب كلمة القصر التلقائي (**Auto shorting**) وذلك بالضغط عليه ليتحول لونه للأزرق، بالإضافة لتحديد قيمة تيار الفحص (يُمكن ضبط هذا القيمة على **5** أمبير) وكذلك التردد يتم تحديده (**50** هيرتز) كما هو مُبين بالشكل (**7-1-17**).



الشكل رقم (7-1-17)

34. تفعيل خاصية تصحيح القيمة المُقاسة لدرجة الحرارة القياسية المرجعيّة (75°) درجة مئوية مثلاً وذلك بالضغط على الشريط بجانب كلمة تصحيح الحرارة (Temperature Correction) ليتحول لونه للأزرق، بعد ذلك نقوم بإدخال درجة حرارة المحول أثناء الفحص بالإضافة لنوع المادة المكوّنة للملفات وعادة ما تكون من النحاس (Copper) كما هو مُبين بالشكل (7-1-18).



الشكل رقم (7-1-18)

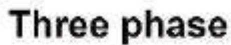
35. بعد ذلك نقوم بالإنتقال إلى نافذة التبويب الثانية (Three phase) في حال أردنا إجراء الفحص بالأسلوب ثلاثي الطور المُكافئ، أو الإنتقال لنافذة التبويب الأخرى (Per phase) وذلك لإجراء الفحص بالأسلوب آحادي الطور، وبعد إختيار أسلوب الفحص بواسطة الضغط على نافذة التبويب المناسبة وظهور إحدى الشاشتين المبينتين في الشكل (7-1-19) ولبدء الفحص، نقوم بالضغط على زر إبدأ (Start) أسفل يمين الشاشة والتأكد من إنارة الحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) الظاهر في الشكل (7-1-4) وبذلك يكون الجهاز بوضعية الإستعداد للحقن.



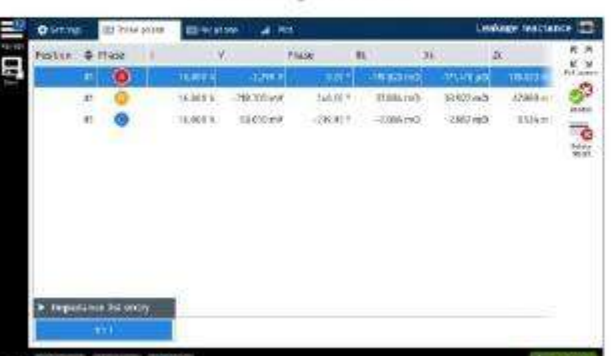
الشكل رقم (7-1-19)

36. الضغط على زر إبدء/توقف (Start/Stop) الظاهر في الشكل (7-1-4) ليبدأ الفحص ويتم الحقن الفعلي للتيار ويبدأ الضوء الأحمر والحلقة الزرقاء حول زر (Start/Stop) بالوميض بشكل متقطع.

37. بعد الإنتهاء من الفحص يومض الضوء الأخضر وبعدها يُمكن إيجاد النتائج في علامة التبويب آحادي أو ثلاثي الطور (Tree/Per phase) كما هو مُبين بالشكل (7-1-20) وبذلك يكون قد إنتهى الفحص.



Per phase





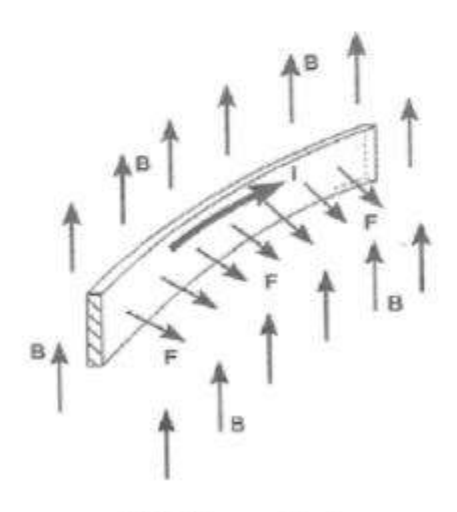
الشكل رقم (7-1-20)



تحذير: لا تقُم بإزالة أسلاك الفحص إلى بعد التأكد من أن لمبة الإشارة التحذيرية الحمراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُطفئة (OFF) ولمبات الإشار التحذيرية على الواجهة الجانبية لجهاز الفحص مُطفئة أيضاً (OFF)، وكذلك لمبة الإشارة الخضراء على الواجهة الأمامية (الرئيسية) لجهاز الفحص مُضيئة (ON).

الملحق (7-2)

كما هو معلوم أن الموصلات الحاملة للتيار والواقعة في مجال مغناطيسي تتعرض لقوى ميكانيكية شتى طبقاً لقانون لنز (قاعدة اليد اليمنى)، لذلك عند تصميم المحولات يتم أخذ هذه القوى بعين الإعتبار ليتمكن المحول من تحمُّل هذه القوى والإجهادات الميكانيكية أثناء حدوث الأعطال وأثناء الظروف التشغيلية الطبيعية، ولكن قد تزداد قيمة هذه القوى المؤثرة عن الملفات فوق الحدود المسموح بها نتيجة لمرور تيارات عطل بقِيَم مرتفعة مما يؤدي لظهور قوى كهرومغناطيسية (**Electromagnetic forces**) كبيرة محدثة تشوّه للملفات. حيث تعتمد قيمة هذه القوى على قيمة التيار المار في هذه الموصلات الواقعة ضمن مجال مغناطيسي (**Magnetic Field**) كما هو مبين بالشكل (**7-2-1**) والمعادلة (**7.2.1**).



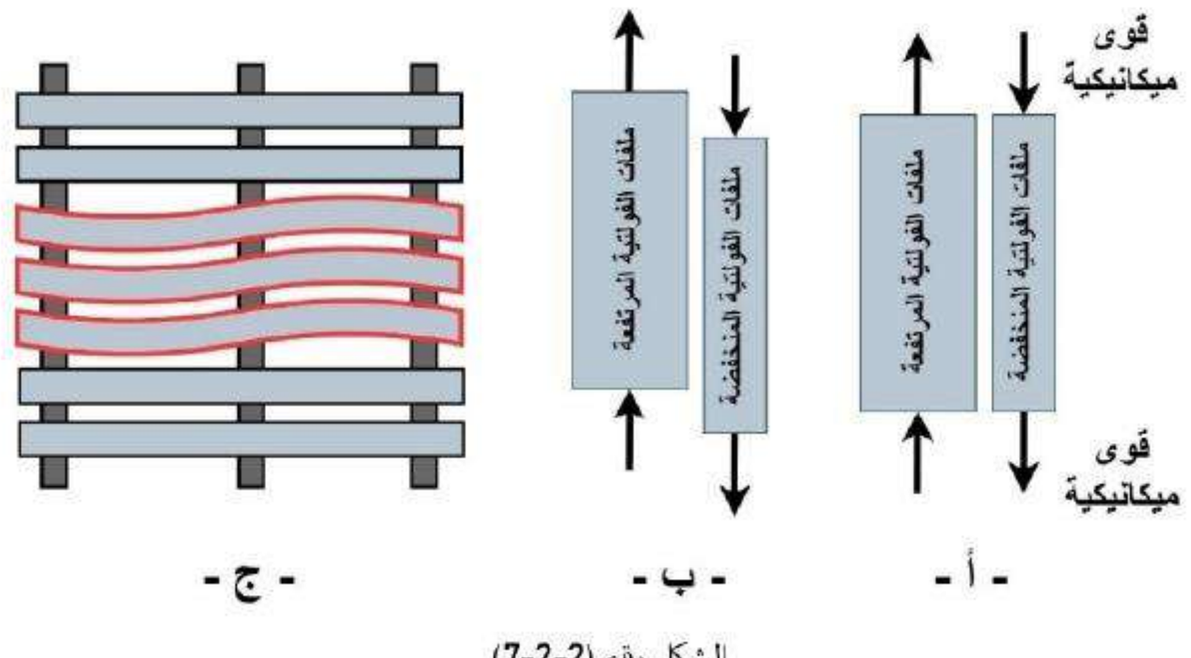
الشكل رقم (**7-2-1**)

$$\vec{F} = I \int \vec{dl} \ x \ \vec{B} \qquad (7.2.1)$$

حيث (I) يمثل التيار المُتجهي (**Current vector**) بالأمبير (**A**) و (l) يُمثل طول الموصل بالمتر (**m**) و (B) يُمثل كثافة الفيض المغناطيسي المُتجهي (**Flux density vector**) بالتسلا، ففي حال مرور تيارات مرتفعة المِقدار كتيارات العطل (القِصَر) أو تيارت البدء (**Inrush currents**) سيؤدي ذلك لزيادة القوى المؤثرة على الملفات مما ينتج عنه تشوه في البُنية الفيزيائية للملفات، وهذا التشوّه يتلخص بالأنواع التالية لا حصراً:

- ✓ **التشوّه المِحوري (Axial Deformation)**

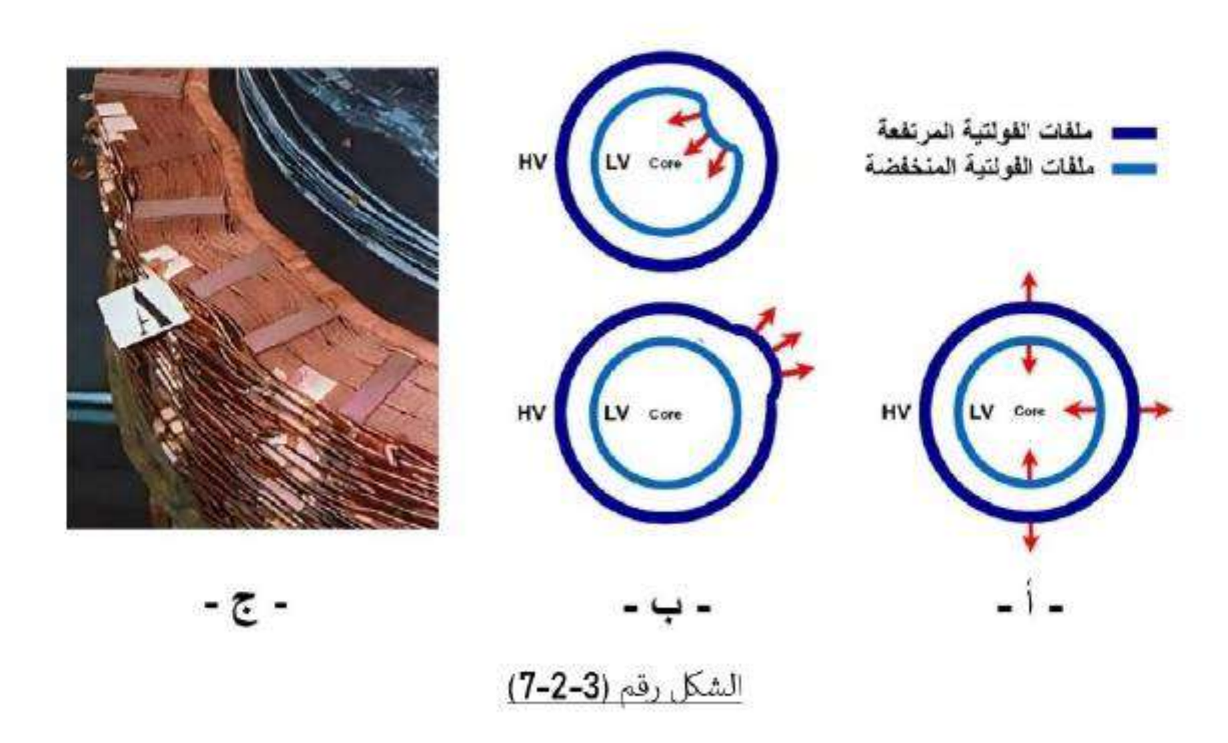
ويظهر هذا النوع من تشوّه الملفات نتيجة لتعرضها لقوى مِحورية (**Axial Forces**) قد تؤدي لتشوه ملفات الفولتية المرتفعة و المنخفضة كإزاحتها وفقدانها للمحاذاة فيما بينها كما يظهر بالشكل (**7-2-2**).



الشكل رقم (7-2-2)

✓ التشوّه الشُعاعي/القُطري (Radial Deformation)

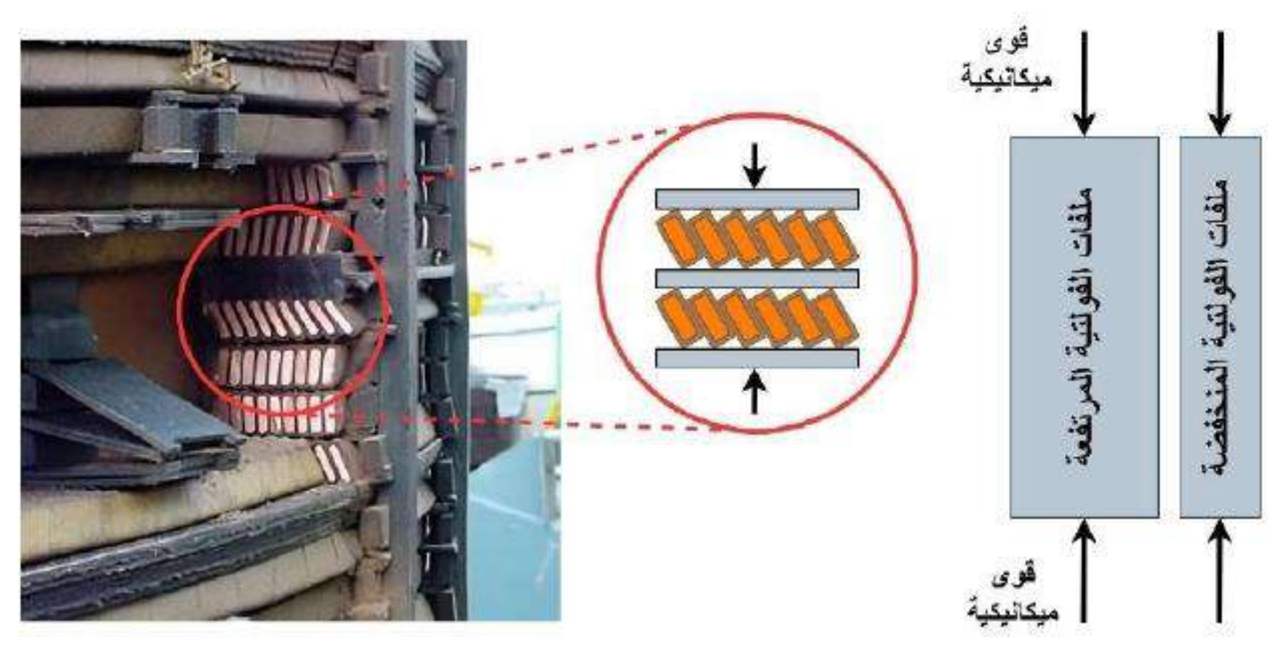
ويظهر هذا النوع من تشوّه الملفات نتيجة لتعرضها لقوى شُعاعية قُطرية (**Radial Forces**) قد تؤدي لتشوّه ملفات الفولتية المرتفعة أو المنخفضة كما يظهر بالشكل (**7-2-3**) الذي يُظهر النوع الحر من التشوّه (**Free buckling**) بالإضافة لنوع آخر وهو التشوّه القَسري (**Forced buckling**).



الشكل رقم (7-2-3)

✓ ميلان الموصلات – **Conductor Tilting**

ويظهر هذا النوع من تشوّه الملفات نتيجة لتعرضها لقوى ضغط تؤثر على ملفات الفولتية المرتفعة أو المنخفضة نفسها والذي بدوره يؤدي لتشوّه بُنية الملفات الداخلية كما هو مُبين بالشكل (**7-2-4**).



الشكل رقم (**7-2-4**)

بالإضافة لأنواع كثير مختلفة من تشوهات الملفات والتي قد لا تؤثر بشكل لحظي على أداء المحول، ولكنها ستؤدي إلى تَغيُّر إجهاد الفولتية (**Voltage stress**) للمادة العازلة مُحدثةً تفريغ جزئي (**Partial discharge**) من شأنه إضعاف وفشل هذه المادة العازلة مما يؤدي إلى حدوث أعطال مثل قِصَر بين لفات المحول (**Turn to turn fault**) في الغالب، ومن الجدير بالذِكر أنه للمحولات ذات القلب الحديدي ثلاثي الأعمدة (**Core type**) والملفات من النوع (**Concentric**) فإن الإزاحة أو التشوّه المحوري (**Axial**) يُعد أكثر خطورة من نظيره الشعاعي/القُطري (**Radial**) وقد يؤدي إلى فشل المحول بشكل كبير وخطر.

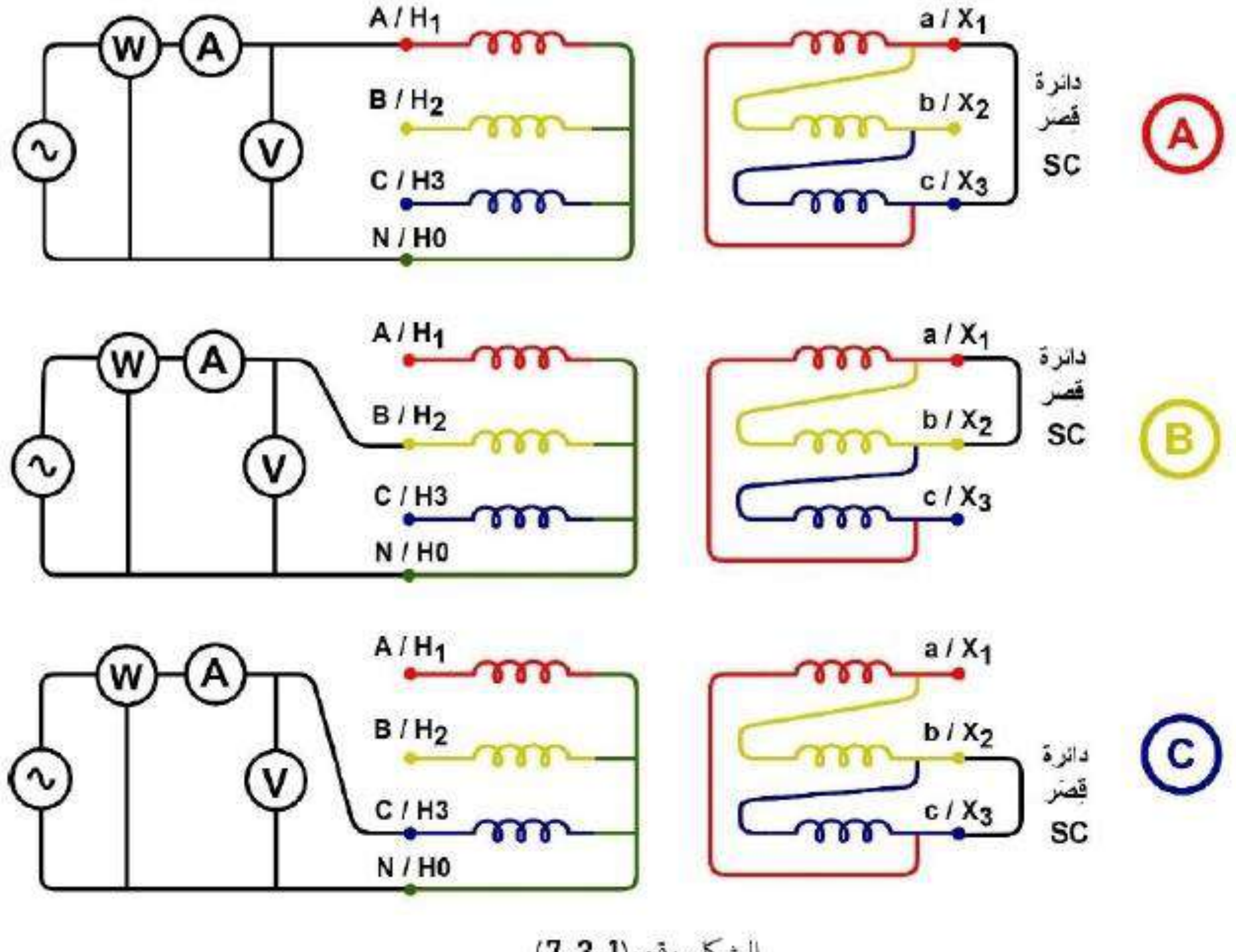
الملحق (7-3)

يَضُم هذا المُلحق التوصيلات الخاصة بفحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage Reactance**) بالأسلوب آحادي الطور (**Per phase test**) لبعض مجموعات توصيل المحول (**Connection group**).

- مجموعة التوصيل – YNd11

<u>الجدول رقم (7-3-1)</u>

مجموعة التوصيل (YNd11)	
الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها	**الأطراف الواجب قصرها (SC)**
H1 – H0	X1 – X3
H2 – H0	X2 – X1
H3 – H0	X3 – X2

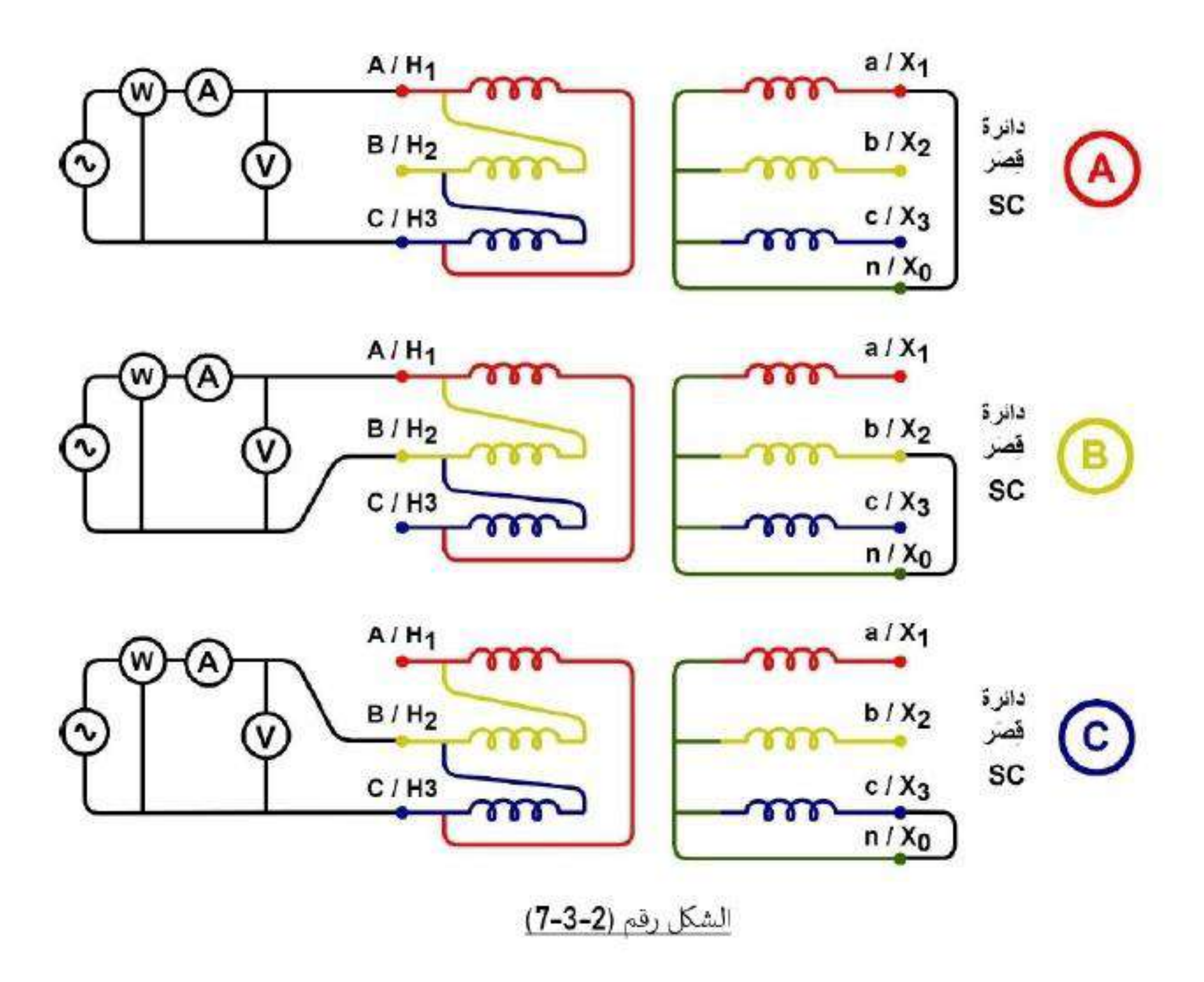


<u>الشكل رقم (7-3-1)</u>

- مجموعة التوصيل – Dyn1

الجدول رقم (7-3-2)

مجموعة التوصيل (Dyn1)	
الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها	الأطراف الواجب قصرها (SC)
H1 – H3	X1 – X0
H2 – H1	X2 – X0
H3 – H2	X3 – X0



الشكل رقم (7-3-2)

الفصل الثامن

فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي

Sweep Frequency Response Analysis Test (SFRA)



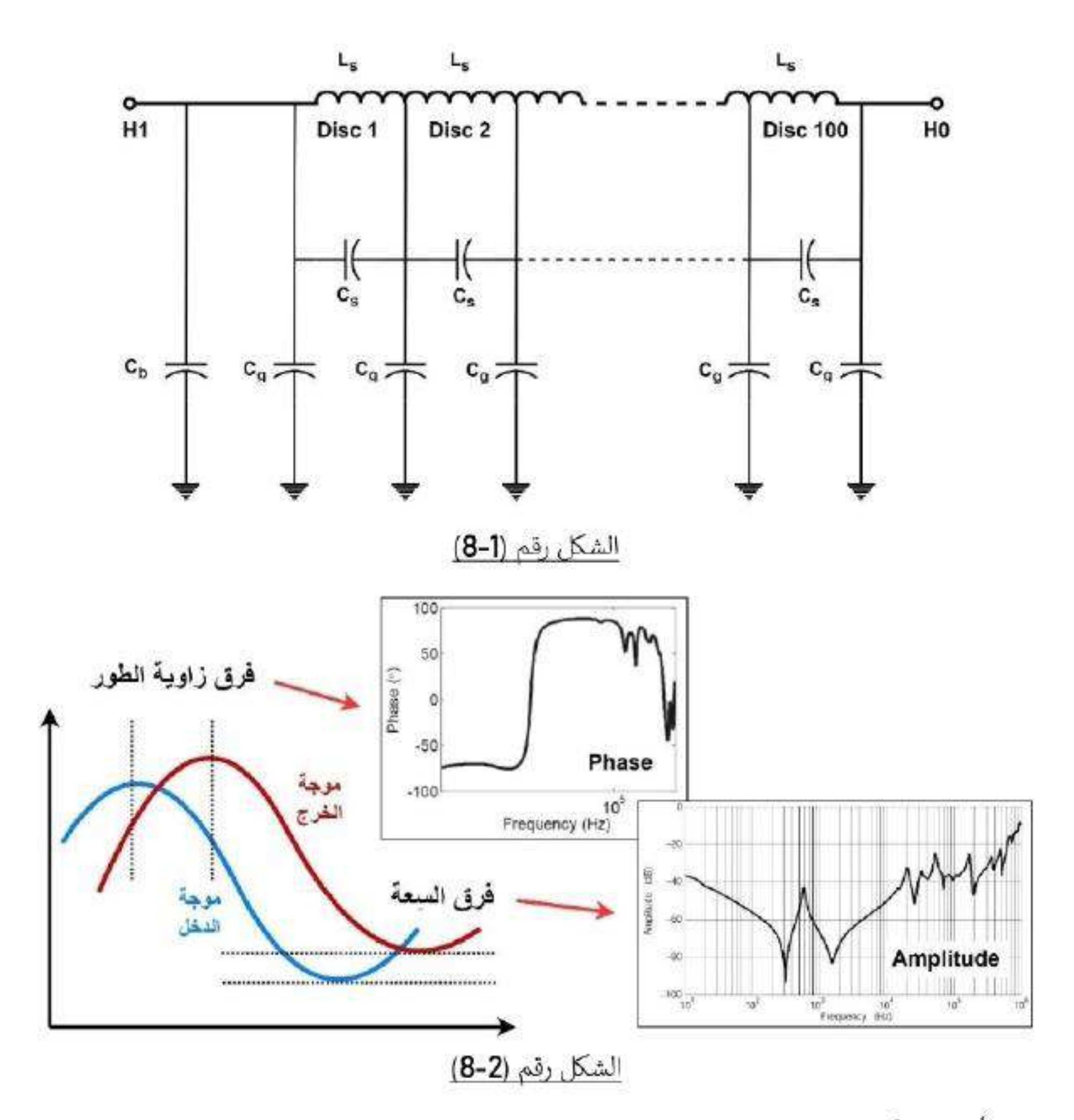
فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي
Sweep Frequency Response Analysis (SFRA)

يُعتبر فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (**SFRA**) من الفحوصات التي يتم الإعتماد عليها في الكشف عن التشوّهات التي تطرأ على ملفات المحول بشكل أساسي والتي يَصعُب الكشف عنها بواسطة الفحوصات التقليدية كفحص نسبة عدد اللفات (**TTR**) أو مقاومة الملفات (**WRM**) أو تيار التهييج (**Excitation current**)، حيث أن هذا الفحص بالإضافة لفحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage reactance**) وفحص الفولتية المنخفضة النبضي أو الدَفعي (**Low voltage impulse test – LVI**) من الفحوصات الحساسة لتشوّهات الملفات كُلاً بدرجة مُعيّنة من الحساسية بالإضافة لمجموعة من المزايا والعيوب لكل فحص من هذه الفحوصات والتي تميزها عن بعضها البعض.

فكما هو معلوم يُمكن تمثيل أو نَمذجة المحول (**Transformer modeling**) بواسطة منظومة من المقاومات المادية (R) كمقاومة الملفات بالإضافة للمحاثات (L_s) كمحاثة الملفات أيضاً بالإضافة للمواسعات (C) كالمواسعة بين أقرص الملفات (**Winding discs**) والتي يُشار إليها بـ(C_s) أو بين الملفات والأجزاء المؤرضة كالقلب الحديدي وخزان المحول (C_g) أو بين الموصل الوسطي المار بعوازل الإختراق وخزان المحول المؤرض (C_b) وغيرها من الأجزاء التي يُمكن تمثيلها بواسطة هذه المُركبات كما هو مُبين بالشكل (**8-1**)، وفي حال حدوث تغيُر ميكانيكي على الملفات أو القلب الحديدي فإن هذه المنظومة من المقاومات والمحاثات والمواسعات ستختلف وفق نمط معيّن تبعاً لنوع العطل مما ينعكس على نتيجة هذا الفحص ويدُلّ على وجود هذا النوع من الأعطال، حيث أن الإستجابة الترددية (**Frequency Response - FR**) تكون بدلالة المُركّبات المُكوّنة لمنظومة المحول (**RLC**) وأي إختلاف في هذه المُركبات سيؤثر على هذه الإستجابة الترددية. ففي هذا الفحص يتم تطبيق موجة فولتية منخفضة جيبية بتردد مُتغيّر على أحد أطراف الملفات ويتم قياس هذه الموجة على طرف آخَر لنفس الملف أو لملف آخر وفقاً لنمط الفحص المُتّبع، ومنه يتم مقارنة نسبة الفولتية (**Voltage ratio**) وفرق الطور (**Phase difference**) لموجتي فولتية المَدخل (V_{in}) والمَخرج (V_{out}) ويتم رسمهما بيانياً نسبة للتردد (**Frequency**) كما هو مبين بالشكل (**8-2**). ونظراً لأن فولتية الفحص أقل من قيمة الفولتية الإسمية للمحول فإن هذا الفحص يُعد من الفحوصات غير التدميرية (**Non-destructive test**).



ملحوظة (8-1): إختلفت التسميات الخاصة بالقيمة المُقاسة، فقد تمت تسميتها بنسبة الفولتية (**Voltage ratio**) وأيضاً تُسمى بالسِعة (**Amplitude**) أو المِقدار (**Magnitude**) وعند ذِكر أي من هذه التسميات في سياق الشرح فإن المقصود واحد.



الشكل رقم (1-8)

الشكل رقم (2-8)

وكما ذُكر سابقاً فإن سلامة أي محول تتلخص في سلامة ثلاثة أنظمة داخلية للمحول وهي نظام العزل و النظام الميكانيكي والنظام الحراري، حيث أن أي فشل في أي من هذه الأنظمة سيؤدي إلى فشل المحول بالكامل، وهذا الفحص يُمكّن من الكشف عن سلامة النظام الميكانيكي وذلك بالكشف عن أي تشوّه أو إزاحة لملفات أو قلب المحول الحديدي.

1. متى يتم إجراء هذا الفحص ولماذا؟

هنالك عدة أسباب تدفعُنا لإجراء هذا الفحص ومن هذه الأسباب ما هو روتيني للتأكد من سلامة المحول أو تشخيصي لتحديد الأعطال في المحول (وهو مجال بحثنا في هذا الكتاب) أو لأسباب خاصة أُخرى، وتتلخص هذه الأسباب بالآتي:

1.1 في المصنع لضبط الجودة المَصنعيّة (**Quality Control - QC**) وكذلك يُعتبر من فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test - FAT**) للتأكد من سلامة المحول ومطابقته للتصميم

قبل نقله للموقع، كما ويُنصح بإجراء هذا الفحص بعد فحص دائرة القِصَر المَصنعي (**Short circuit test**) وذلك للتأكد من سلامة المحول بعد هذا الفحص.

1.2 في الموقع قبل كهربة المحول للمرة الأولى (**Transformer first energization**) كأحد فحوصات القُبول المَوقعيّة (**Site Acceptance Test - SAT**) للتأكد من سلامة المحول بعد نقله وتركيبه في الموقع.

1.3 قبل كهربة المحول (**Transformer energization**) بعد نقل المحول من مكان لآخر.

1.4 بشكل روتيني (**Routine test**) وذلك للكشف عن وضع المحول الحالي وإستخدام نتيجة هذا الفحص كمرجع (**Reference value**).

1.5 لغايات نَمذجة الأنظمة (**System Modeling**)، حيث بواسطة هذا الفحص يُمكن إستخراج قِيَم بعض المُركّبات اللازمة لنمذجة دائرة المحول وغيره من الأنظمة.

1.6 تحديد الأعطال داخل المحول (**Fault detection – Diagnostic test**)، وهو ما سيتم تناوله في هذا الفصل.

2. الدوافع التشخيصية لعمل هذا الفحص وما هي الأعطال التي يتم الكشف عنها

كما هو معلوم أن هذا الفحص يهدف للكشف عن أي تشوّه أو إزاحة للملفات وللقلب الحديدي للمحول، لذلك عادةً ما يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بهدف تشخيصي في حال تعرُض المحول لظروف أو أحداث قد تؤدي لزيادة الإجهاد الميكانيكي الواقع على ملفات وقلب المحول وما يترتب عليها من أعطال ميكانيكية أو كهربائية للمحول، وعلى سبيل المثال لا الحصر يُمكن إيجاد الأمور التالية:

- تعرُّض المحول لإجهاد ميكانيكي ناتج عن عطل كهربائي مثل الأعطال الأرضية (**Earth faults**) أو أعطال القِصَر (**Short circuit**) أو ضربات البرق (**Lightning**) وما ينتج عنها من تيارات ذات قِيَم مُرتفعة، أو تعرُّض المحول لتيارات بدء (تدفق) مُرتفعة (**High inrush currents**).
- تعرُّض المحول لفصل قَسري (**Trip**) نتيجة لتفعّل مُرحل البوخلز (**Buchholz relay**) أو مُرحل إرتفاع الضغط المفاجئ (**Sudden pressure relay**) أو غيره من الحمايات الفيزيائية.
- إرتفاع درجة حرارة المحول أو ظهور قِيَم مُرتفعة لِنِسَب الغازات القابلة للإحتراق الذائبة في زيت المحول (**Dissolved combustible gas**).
- قراءات غير جيدة لجهاز تسجيل الصدمات (**Impact recorder**) حيث أن هذه الجهاز يتم تثبيته على جسم المحول أثناء نقله للتأكد من عدم تعرضه للصدمات فوق الحدود المسموح بها كتعرُضه لصدمة ميكانيكية كبيرة كالسقوط أثناء عملية النقل.
- الهزات الناتجه عن الزلازل أو غيرها من الكوارث الطبيعية والتي قد تُلحِق ضرراً ميكانيكياً بالمحول.
- في حال الحصول على نتائج فحوصات غير مُرضية خاصة لفحص المواسعة (**Capacitance**) وفحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage reactance**) وفحص تيار التهييج (**Excitation current**).

ومن الأعطال التي يتم الكشف عنها من خلال هذا الفحص:

- وجود تشوّه أو إزاحة للملفات ككُل (**Bulk winding deformation or displacement**).
- وجود تشوّه في ملف من الملفات بشكل محوري أو شُعاعي/قُطري (**Coil axial or radial deformation**).
- وجود تشوّه أو إزاحة للقلب الحديدي (**Core deformation or displacement**).
- وجود قَطع في ملفات المحول (**Open circuit**).
- وجود قِصَر (**Short circuit**) بين لفات الملفات المختلفة من المحول أو بين اللفات من نفس الملف.
- وجود كسر في دعائم التثبيت الداخلية أدى لحدوث تشوّه في الملفات والقلب الحديد.
- وجود مشكلة في تأريض القلب الحديدي أو فقدان التأريض.

ففي حال تعرُض المحول للصدمات أو الإهتزازات أو السقوط أثناء النقل فإنه يَسهُل تصوّر السبب الذي أدى لتشوه بُنية الملفات الفيزيائية، أما فيما يخُص التشوّه الناتج عن التيارات المرتفعة كتيارات البدء (**Inrush currents**) وتيارات العُطل (**Fault currents**) ولفهم آلية حدوثه يُمكن الرجوع للملحق (**7-2**) من الفصل السابق.

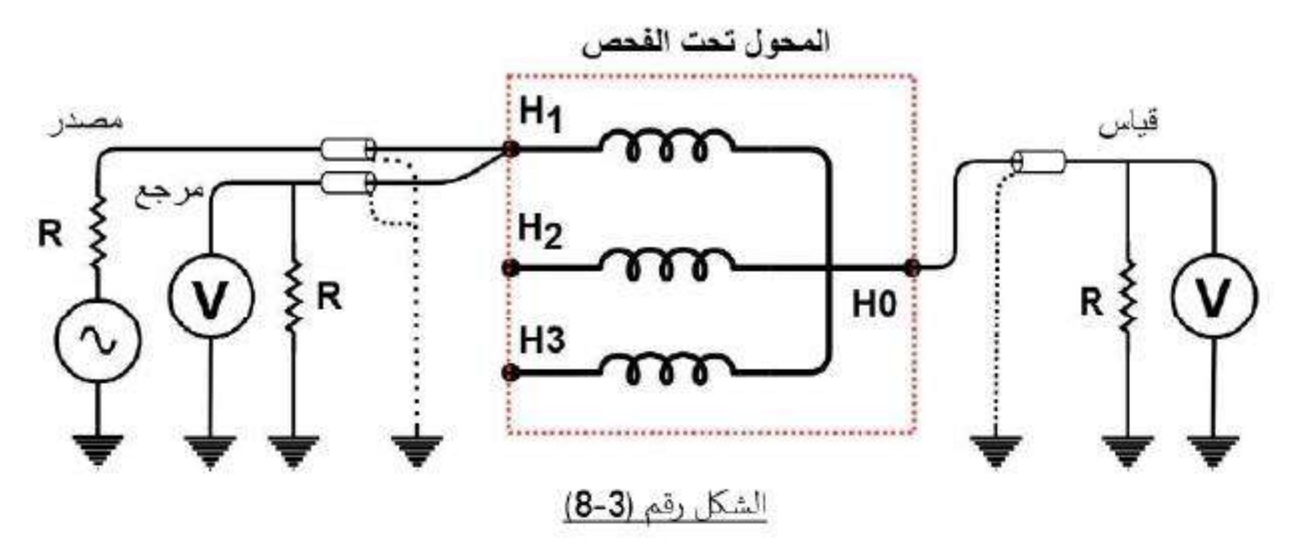
3. فلسفة الفحص

يتم تصميم المحولات بحيث تكون قادرة على تحمل الإجهاد الميكانيكي المؤثر عليها أثناء نقلها أو أثناء عملها في الظروف الطبيعية أوغير الطبيعية كالأعطال أو الحالات العابرة (**Transients**)، ولكن قد يزيد هذا الإجهاد عن الحدود المسموح بها خاصة في حالات الأعطال ذات التيارات الكبيرة أو نتيجة لضعف المادة العازلة وتقادمها مما يؤدي لحدوث تشوّه وتلف للملفات أو القلب الحديدي، في هذه الحالة فإن المنظومة المُكوّنة لهذا المحول والتي تتمثل بمجموعة من المقاومات والمحاثات والمواسعات (**RLC**) ستختلف وفق نمط معيّن تبعاً لنوع العطل، مما ينعكس على نتيجة هذا الفحص ويدُل على وجود هذا النوع من الأعطال حيث أن الإستجابة الترددية (**Frequency Response - FR**) تكون بدلالة (**Function of**) هذه المُركبات المكوّنة لمنظومة المحول (**RLC**)، لذلك فإنه يتم اللجوء لعمل هذا الفحص بالإضافة لمجموعة من الفحوصات الأُخرى ذات الحساسية لهذا النوع من الأعطال كفحص مُفاعلة التسرُب (**Leakage reactance**) وفحص الفولتية المنخفضة النبضي أو الدَفعي (**Low voltage impulse test - LVI**) وفحص تيار التهييج (**Excitation current**) وفحص الإستجابة الترددية للضياعات الشاردة (**Frequency response of stray losses - FRSL**) بالإضافة لفحص المواسعة (**Capacitance**)، الجدول (**1-8**) يُبين مقارنة بين هذه الفحوصات وفقاً لما ورد في الدراسة الصادرة عن المجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة [**CIGRE Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA) 342**].

الجدول رقم (8-1)

الفحص	المزايا	العيوب
فحص تيار التهييج Excitation current test	- يحتاج جهاز فحص بسيط نسبياً. - يُمكنه كشف أعطال القلب الحديدي للمحول.	- غير حساس لتشوّه الملفات. - نتيجة الفحص تتأثر بقوة بالمغناطيسية المُتبقية.
فحص مُفاعلة التسرُّب Leakage reactance test	- يُمكن الفحص بالطريقة التقليدية المواضحة في معايير فحص دائرة القِصَر. - القيمة المرجعية للفحص موجودة على لوحة بيانات المحول لغايات المُقارنة.	- تغيُّر بسيط في قيمة مُفاعلة التسرُّب قد يكون سببه عطل كبير. - غير حساس لجميع أنماط تشوّه الملفات (جيد في كشف تشوه الملفات الشُعاعي/القُطري **Radial**).
فحص تحليل الإستجابة الترددية للضياعات الشاردة Freq. response of stray losses test - FRSL	- أكثر حساسية من فحص مُفاعلة التسرُّب. - يكاد يكون الوحيد القادر على كشف دائرة القِصَر بين الموصلات المتوازية في ملفات المحول.	- لا يُستخدم بشكل قياسي في المنشأت الصناعية.
فحص مواسعة الملفات Winding capacitance test	- قد يكون أكثر حساسية من فحص مُفاعلة التسرُّب. - جهاز الفحص القياسي متوفر.	- غير حساس لجميع أنماط تشوّه الملفات (جيد في كشف تشوه الملفات الشُعاعي/القُطري **Radial**). - قد لا يُمكن قياس المواسعة المطلوب خاصة عند فحص المحولات التلقائية (Autotransformers) - تغيُّر بسيط في قيمة المواسعة قد يكون سببه عطل كبير. - نتيجة الفحص تتأثر بدرجة الحرارة.
فحص الفولتية المنخفضة النبضي أو الدفعي Low voltage impulse test - LVI	- معترف بحساسيته الكبيرة في الكشف عن تشوّه الملفات.	- يحتاج جهاز فحص متخصص. - صعوبة تحليل نتائجه. - صعوبة تكرار الفحص بنفس الحساسية.
فحص تحليل الإستجابة الترددية المسحي Sweep frequency response analysis test - FRA	- يُمكن تكرار الفحص بنفس الحساسية بشكل أفضل من فحص (LVI). - يُمكن تحليل نتائجه بشكل أسهل من فحص (LVI). - عدد مستخدمين متزايد.	- يلزمه كُتيّب إرشادي لتحليل نتائجه.

بالرجوع لفلسفة الفحص فإنه في هذا الفحص يتم تطبيق موجة فولتية بالنسبة لخزان المحول (المؤرض) على أحد أطراف ملفات المحول بحيث تكون هذه الموجة جيبية ذات مقدار صغير قرابة (**10Vp-p**) ومتغيّرة التردد (**20Hz – 2MHz**) حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [**IEC, 60076-18 2012**]، و من ثم يتم قياس هذه الفولتية المُطبقة لتكون بمثابة موجة مرجعيّة (**Reference**) وقياس فولتية المخرج لتكون موجة إستجابة (**Response**) كما يظهر في الشكل (**8-3**) الذي يُوضح دائرة فحص محول بواسطة كوابل محورية (**Coaxial cables**).

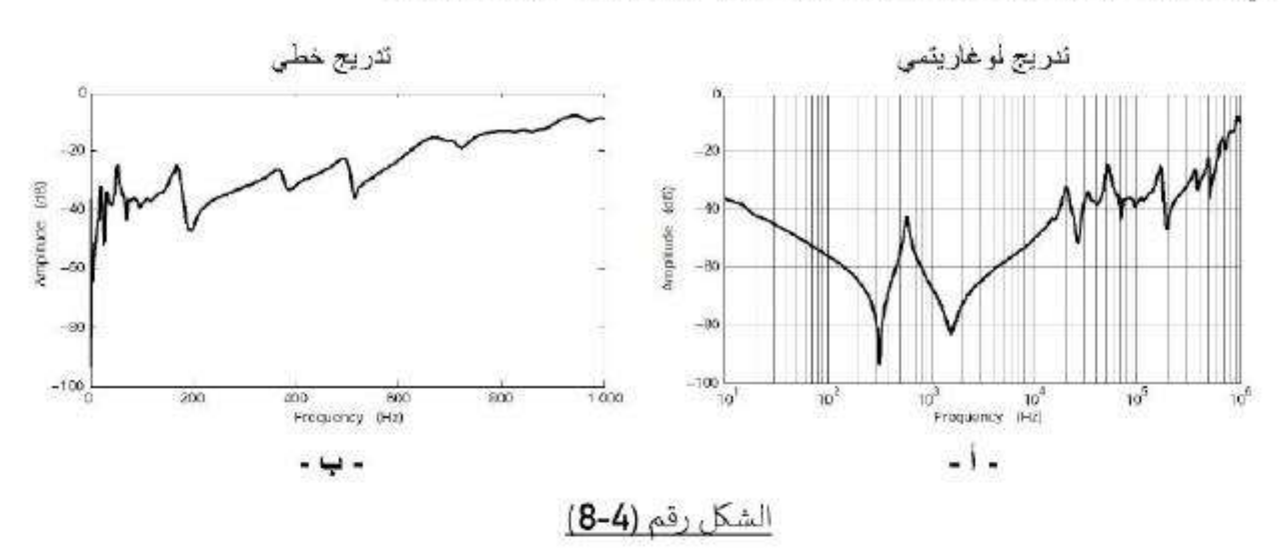


الشكل رقم (8-3)

بعد ذلك يتم إحتساب نِسبة السِعة (**Amplitude ratio**) لموجتي الفولتية ($\frac{V_{out}}{V_{in}}$) وبما أن هذه النسبة تتغيّر على نطاق واسع من القِيَم فإنه يتم إحتساب قيمة إستجابة الفولتية النسبية بالـ(**dB**) بواسطة المعادلة (**8.1**) التالية:

$$Relative\ Voltage\ Response = 20\ \log_{10}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \qquad (8.1)$$

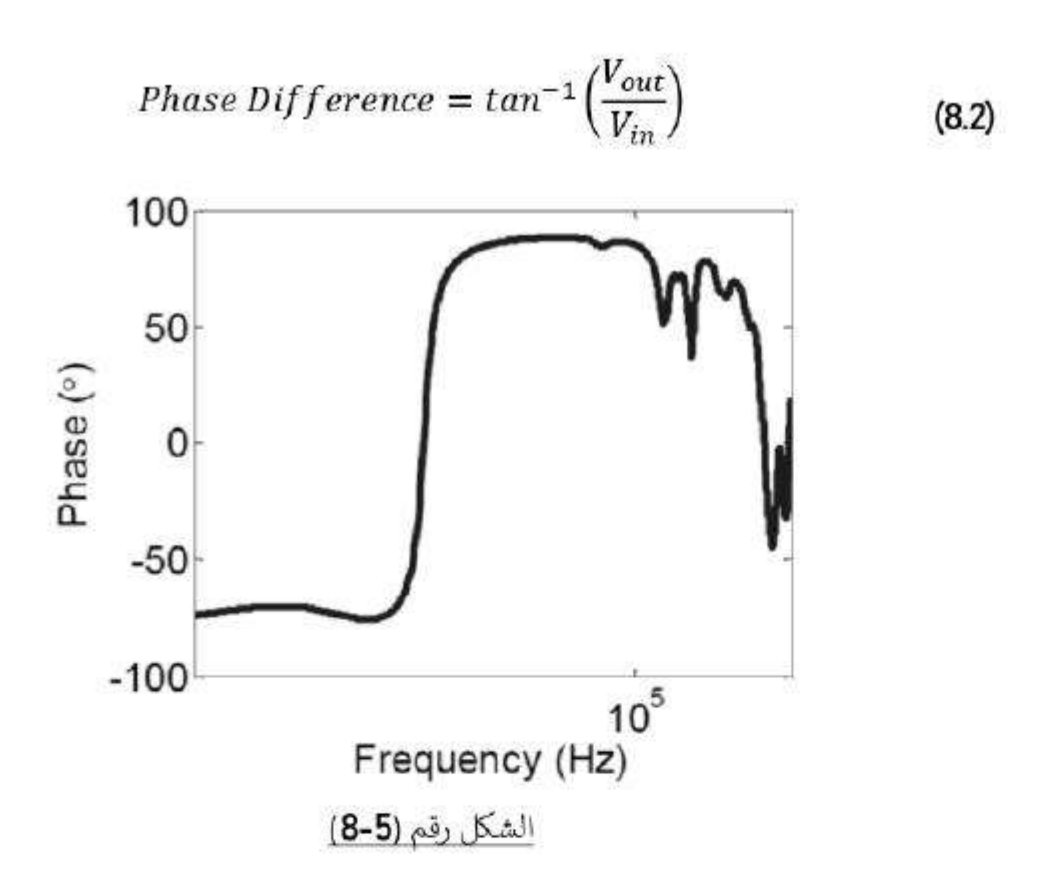
ومن ثم يتم رسم قِيَم إستجابة الفولتية النسبية بالـ(**dB**) بدلالة التردد (**Frequency**). بحيث يُمكن رسم هذه القِيَم بواسطة تدريج تردد لوغاريتمي (**Logarithmic Scale**) كما يظهر في الشكل [(**8-4**) (**أ**)] وهو الأكثر إستخداماً، أو بواسطة تدريج تردد خطي (**Linear scale**) كما يظهر في الشكل [(**8-4**) (**ب**)] الواردة في المِعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [**IEC, 60076-18 20012**].



الشكل رقم (8-4)

كما ويُمكن أيضاً إيجاد فرق الطور بين موجتي الفولتية للمدخل والمخرج (**Phase difference**) بحيث يتم إحتساب قيمة الفرق في الطور بالدرجة (°) بواسطة المعادلة (**8.2**)، ومن ثم يتم رسمها بدلالة التردد كما يظهر في الشكل (**8-5**).

$$Phase\ Difference = tan^{-1}\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad (8.2)$$



الشكل رقم **(8-5)**

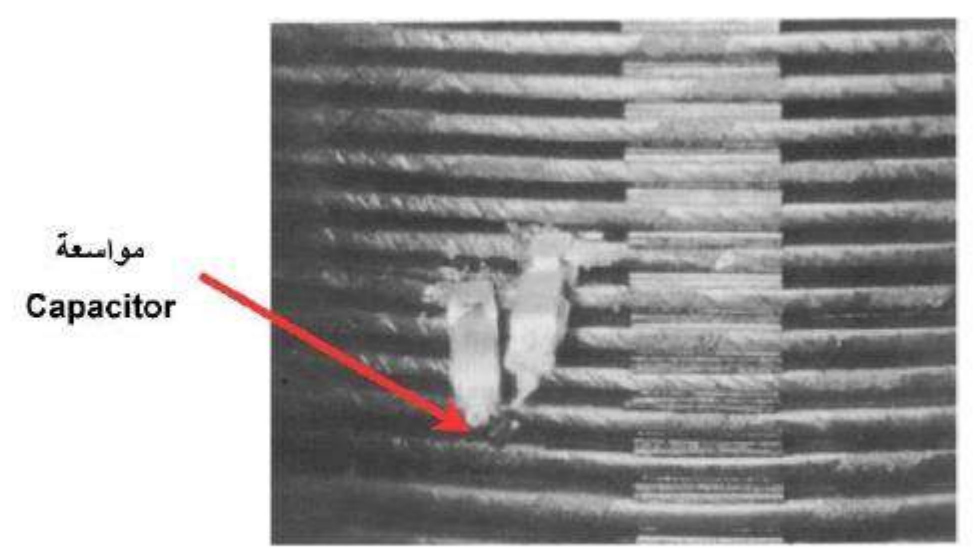
- **كيف يدُل هذا الفحص على وجود تشوّه أو إزاحة في الملفات بالإضافة إلى اعطال القلب الحديدي للمحول كفقدان التأريض مثلاً:**

مما سبق يُمكن ملاحظة أنه في حال حدوث عطل ميكانيكي للملفات والقلب الحديدي فإن ذلك سيؤثر على قِيَم المركبات المُكوّنة للمحول **(RLC)** والمُبينة بالشكل **(8-1)** الذي يوضح الدائرة المُكافئة المُبسطة للمحول **(Cascaded π sections)**، وكما هو معلوم أن أي إختلاف في قيمة هذه العناصر **(RLC)** من شأنه التأثير على نتيجة هذا الفحص و هذا بدوره يُفسّر الإعتماد على هذا الفحص في الكشف عن تشوّه الملفات والقلب الحديدي للمحول.

ولزيادة الفهم سنقوم بعرض حالات لأعطال تمت محاكاتها لمجموعة من المحولات وتتبع الإختلاف الذي يطرأ على نتيجة فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي **(SFRA)** كما ورد في النشرة العلمية **[IEEE, Transformer diagnostic testing by frequency response analysis]**.

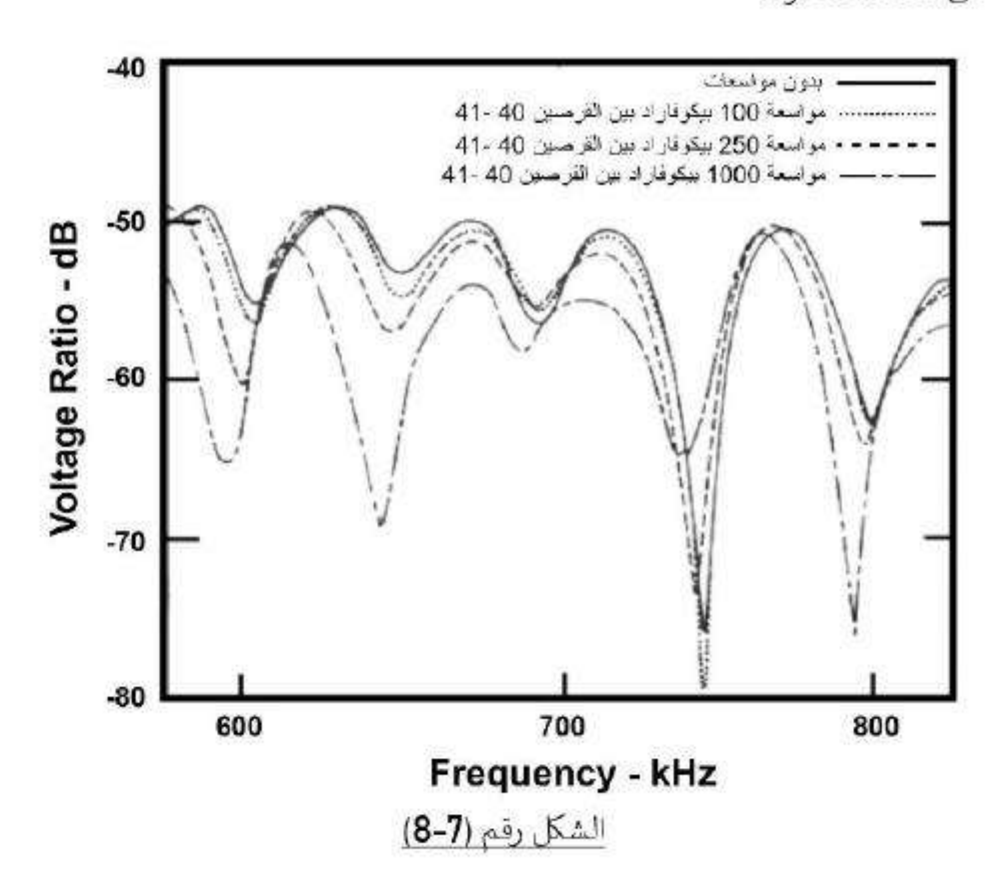
- **الحالة الأولى:**

إختلاف المواسعة بين أقراص ملفات المحول **(Disc to Disc capacitance - C_S)** أو ما يُسمى بالـ**(Inter-disc capacitance)** والذي قد يكون ناتج عن قوى ميكانيكية أدت لإختلاف المسافة بين هاذين الملفين مما أثّر على قيمة المواسعة بينهما. ولمحاكاة هذا النوع من الأعطال تم إضافة مواسعات بقيَم مختلفة **(100, 250, and 1000 pF)** بيكوفاراد بين قُرصين من ملفات محول ذو سِعة **(8 MVA)** ميجا فولت أمبير كما هو مُبين بالشكل **(8-6)** الوارد في المصدر **[79]**.



<u>الشكل رقم **(8-6)**</u>

الشكل (**8-7**) الوارد في المصدر **[79]** يُبين الإختلاف في نتيجة هذا الفحص وفقاً لقيمة المواسعة المُضافة على ملفات المحول.

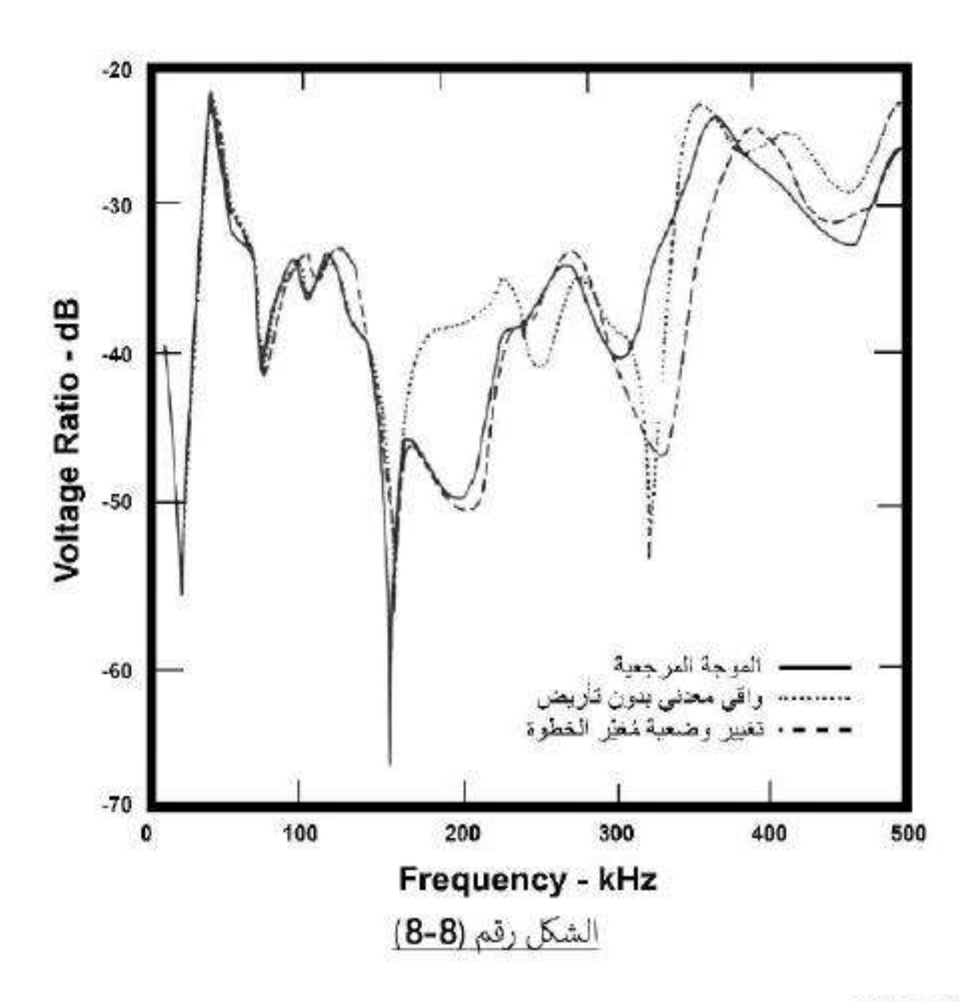


<u>الشكل رقم **(8-7)**</u>

- **الحالة الثانية:**

إختلاف المواسعة بين ملفات المحول والقلب أو الأرضي (**Winding to ground capacitance - C_g**) أو ما يُسمى بال(**Inter-winding capacitance**) والذي قد يكون ناتج عن فقدان تأريض القلب أو فقدان تأريض الواقي المعدني (**Metallic Shield**) الموجود بين ملفات الفولتية المرتفعة والمنخفضة للمحول، ولمحاكاة هذا النوع من الإعطال تم إزالة التأريض الخاص بال(**Metallic Shield**) لمحول بالمواصفات

التالية (GSUT, 550MVA, 230/22 kV, Y/Δ) و إجراء فحص (SFRA) وكانت النتيجة كما هو مُبين بالشكل (8-8) الوارد في المصدر [79]، بحيث يُمكن ملاحظة تأثير إختلاف المواسعة (C_g) عند الترددات الأكبر من (200 kHz) كيلوهيرتز.



الشكل رقم (8-8)

- **الحالة الثالثة:**

إختلاف المحاثة الخاصة بالملفات (**Winding inductance - L_S**) والذي قد يكون ناتج عن اعطال أو عن تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap Changer**)، ولمحاكاة تأثير تغيُّر محاثة الملفات على نتيجة فحص (**SFRA**) تم تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) على طور واحد لمحول ذو سعة (**550 MVA**) ميجا فولت أمبير و إجراء فحص (**SFRA**) وكانت النتيجة كما هو مبين بالشكل (**8-8**)، بحيث يُمكن ملاحظة تأثير إختلاف محاثة الملفات (L_S) الناتج عن تغيير وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) عند الترددات الأكبر من (**200 kHz**) كيلوهيرتز.

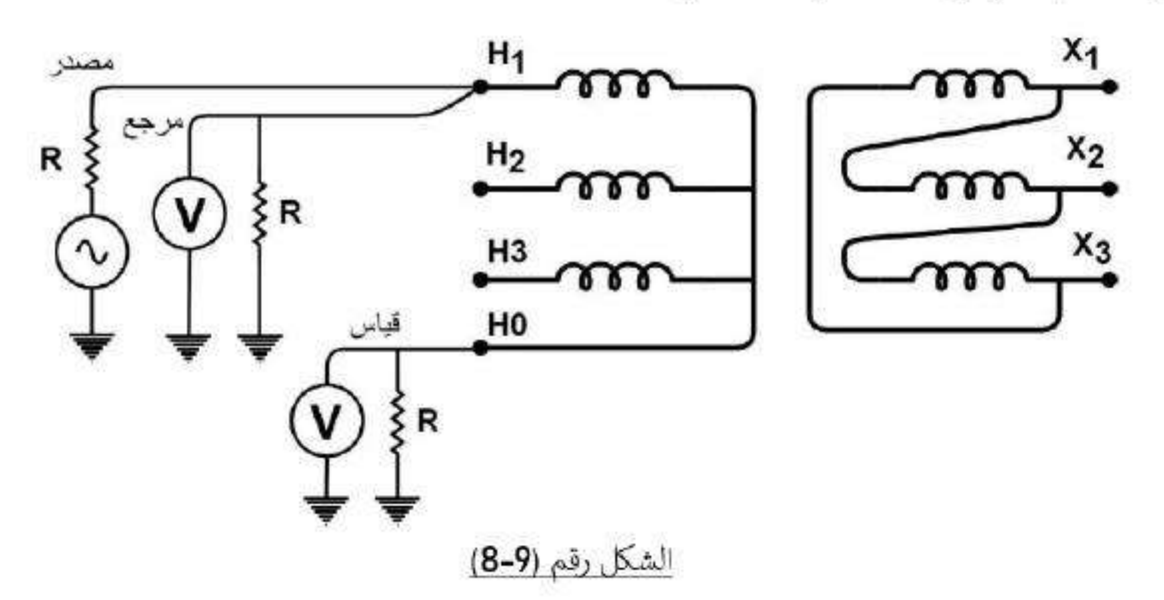
مما سبق يُمكن ملاحظة حساسية هذا الفحص في الكشف عن الأعطال التي قد تصيب الملفات أو القلب الحديدي للمحول والتي تؤدي لتغيير البنية الداخلية للمحول وما ينتج عنها من تغيير لمنظومة العناصر المُكوِّنة للمحول.

4. أساليب الفحص

هنالك عدة توصيلات بين جهاز الفحص والمحول المُراد فحصه يُمكن من خلالها إجراء هذا الفحص وذلك وفقاً للأسلوب المُتّبع، حيث وبالرجوع للمعايير العالمية الصادرة عن أشهر المنظمات كالمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة (**GIGRE**) واللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) ومعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) فإنه تم إعتماد أربعة أساليب رئيسية لإجراء هذا الفحص كالآتي:

4.1 الأسلوب الأول: End to End Open Circuit

يُعد إجراء الفحص بهذا الأسلوب الأكثر شيوعاً والموصى به حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]** بحيث يُمكن تطبيق هذا الأسلوب على ملفات الفولتية المرتفعة (**HV**) أو المنخفضة (**LV**) للمحول سواء كانت موصولة على شكل مثلث (**Delta - Δ**) أو على شكل نجمة (**Star - Y**). وفي هذا الأسلوب يتم تطبيق موجة الفولتية (**Input**) على أحد أطراف الملف (على طور واحد) ويتم قياس الموجة (**Output**) على الطرف الآخر للملف (على نفس الطور)، كما وتجدُر الإشارة أنه في حال كانت الملفات موصولة على شكل نجمة (**Star - Y**) فإنه يُمكن تطبيق الفولتية على أحد الأطراف الأطوار (**H1 or H2 or H3**) والقياس عن طريق طرف نقطة التعادل (**H0**) والعكس صحيح أيضاً حيث أنهما سيُعطيان نفس النتيجة ولكن يجب ذِكر أطراف الحقن والقياس في معلومات الفحص كما ويُنصح بإستخدام نفس توصيلة الفحوصات السابقة.

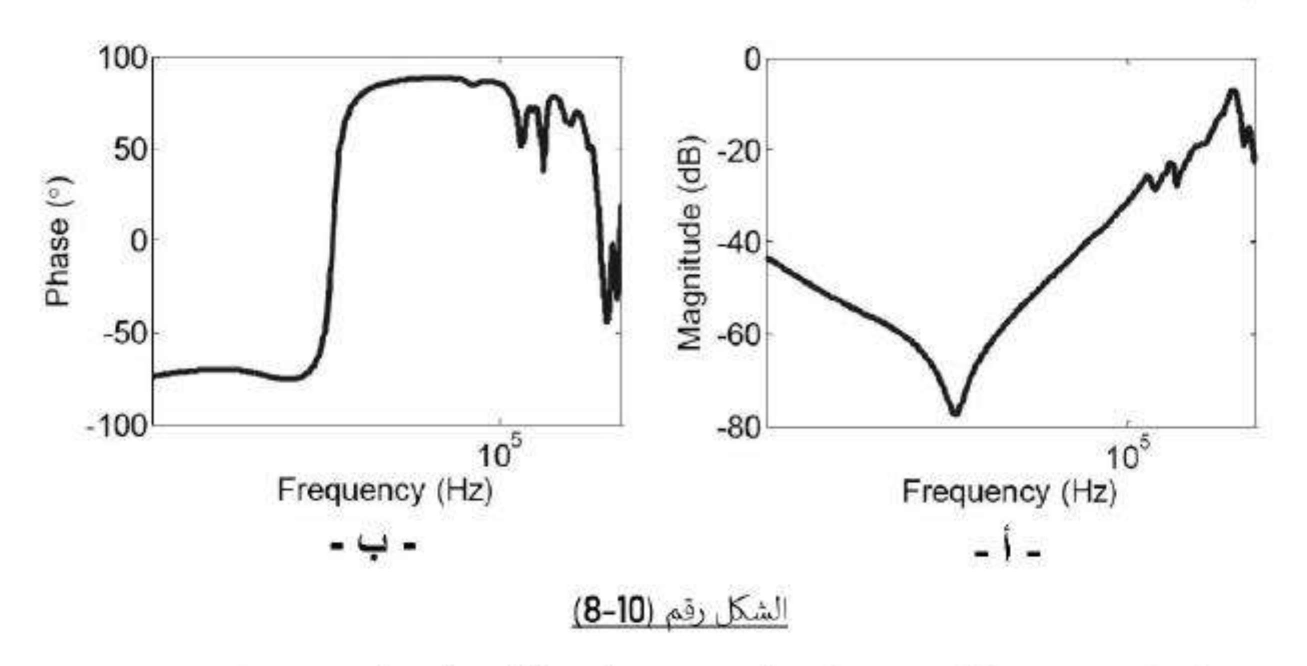


الشكل رقم (**8-9**)

إن مصطلح الدائرة المفتوحة (**Open circuit**) الوارد في إسم هذا الأسلوب يشير إلى ترك أطراف الملفات المحول الثانوية مفتوحة، فمثلاً لو تم إجراء هذا الفحص على أحد أطراف ملفات الفولتية المرتفعة للمحول فيجب ترك أطراف ملفات الفولتية المنخفضة مفتوحة (**Open circuit**) أو (**Floating**) وكذلك الحال لأطراف باقي أطوار ملفات الفولتية المرتفعة التي لا يتم تطبيق الفحص عليها كالأطراف (**H1** و **H2**) في الشكل (**8-9**) السابق، وهذا بدوره يُضفي شبه بين توصيلة الفحص بهذا الأسلوب وتوصيلة فحص تيار التهييج (**Excitation current test**) ويُفسّر هيمنة القلب الحديدي على نتيجة الفحص خاصة عند الترددات المنخفضة كما سيتم شرحه لاحقاً.

الشكل [(8-10) (أ)] يُبين مثال على نتيجة فحص نموذجية (**Typical**) بهذا الأسلوب (**Open circuit**) حيث يُشير الجزء الأول من الرسمة عند الترددات المنخفضة (أقل من **20** كيلوهيرتز تقريباً) إلى حدوث ظاهرة الرنين العكسي (**Antiresonance**) والناتجة عن تأثير محاثة القلب الحديدي المغناطيسية مُضافاً إليها محاثة التسرُّب لذلك نرى إنخفاضات في رسمة السِعة (**Amplitude**) عند هذه الترددات، بعد ذلك تبدأ الرسمة بالإرتفاع نتيجة لتأثير مواسعة الملفات.

وكذلك يُمكن الملاحظة من الشكل [(8-10) (ب)] الخاص بفرق الطور (**Phase**) إنتقال الدرجة من (**-90°**) درجة إلى (**+90°**) وذلك لنفس السبب المذكور أعلاه وهو تأثير المحاثة المغناطيسية للقلب بالبداية ثم بعد ذلك يبدأ تأثير مواسعة الملفات.

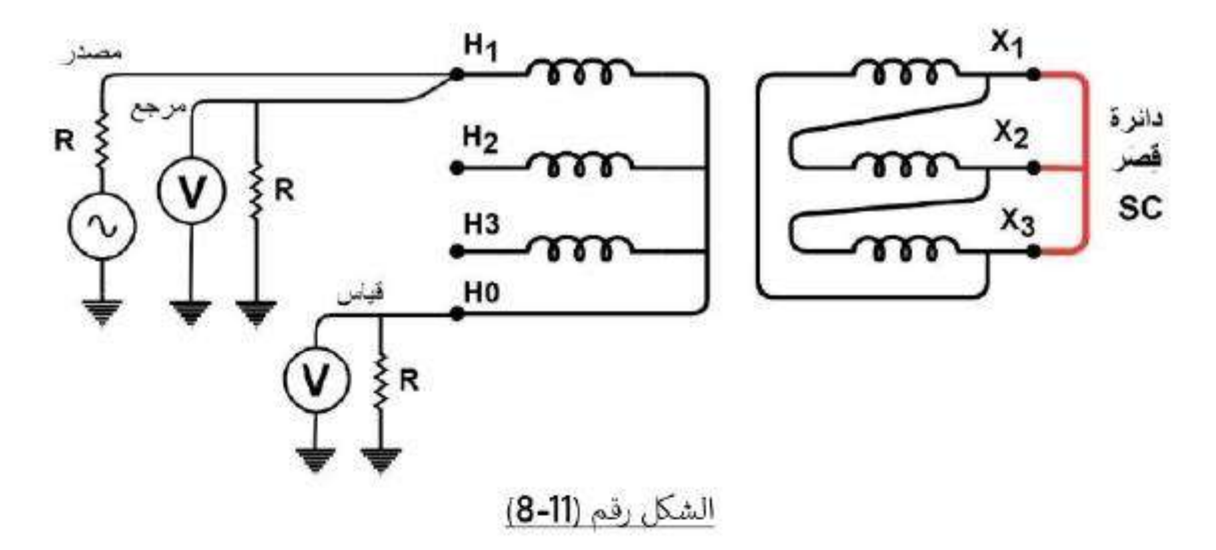


الشكل رقم (8-10)

وبما أن الفحص بهذا الأسلوب يتم على طوار واحد فقط من أطوار المحول، فإنه يستلزم إجراء ستة فحوصات لتغطية كامل ملفات المحول للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات على سبيل المثال وتسعة فحوصات للمحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات.

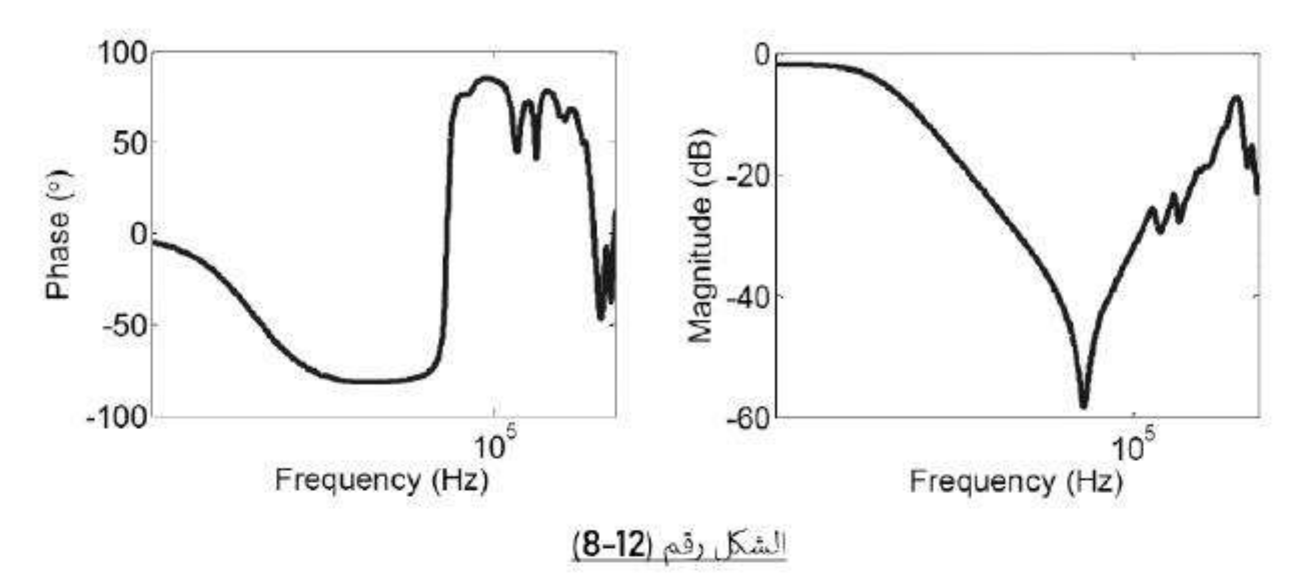
4.2 الأسلوب الثاني: End to End Short Circuit

الفحص بهذا الأسلوب مُشابه لما تم شرحه في الأسلوب السابق، ولكن يَكمُن الإختلاف بينهما في وضعية أطراف ملفات المحول الثانوية حيث أنها كانت مفتوحة (**Floating**) في الأسلوب السابق أما في هذا الأسلوب فإنه يتم قَصرُها (**Short circuited**) كما هو مُبين بالشكل (**8-11**)، ويُمكن أيضا تأريضها بعد قصرها أو تركها مقصورة فقط دون تأريضها (**Floating**)، ومن التوصيلة يُمكن ملاحظة الشبه بينها وبين نظيرتها لفحص مُفاعلة التسرُّب (**Leakage reactance test**) أو فحص مُعاوقة القِصَر (**Short circuit impedance test**).



الشكل رقم **(8-11)**

الشكل **(8-12)** يُبين مثال على نتيجة فحص نموذجية **(Typical)** بهذا الأسلوب **(Short circuit)** حيث أن توصيلة الفحص بهذا الأسلوب كفيلة بإزالة تأثير المحاثة المغناطيسية للقلب الحديدي والإبقاء فقط على تأثير محاثة التسرُّب وهذا بدوره يُفسّر عدم إنخفاض رسمة السعة **(Amplitude)** في بدايتها كما كان الحال في نظيرتها للأسلوب السابق **(Open circuit)**. كما ويُمكن الإستفادة من هذا الأسلوب في حال أردنا التأكد من أن عطل المحول سببه القلب الحديدي أم جُزء آخَر، حيث أنه بواسطة هذا الأسلوب يُمكن تحييد تأثير هذا القلب الحديدي للترددات المنخفضة (أقل من **20** كيلوهيرتز تقريباً)، وكذلك في حال أردنا تجنب تأثير مغناطيسية القلب المُتبقية على نتيجة الفحص.

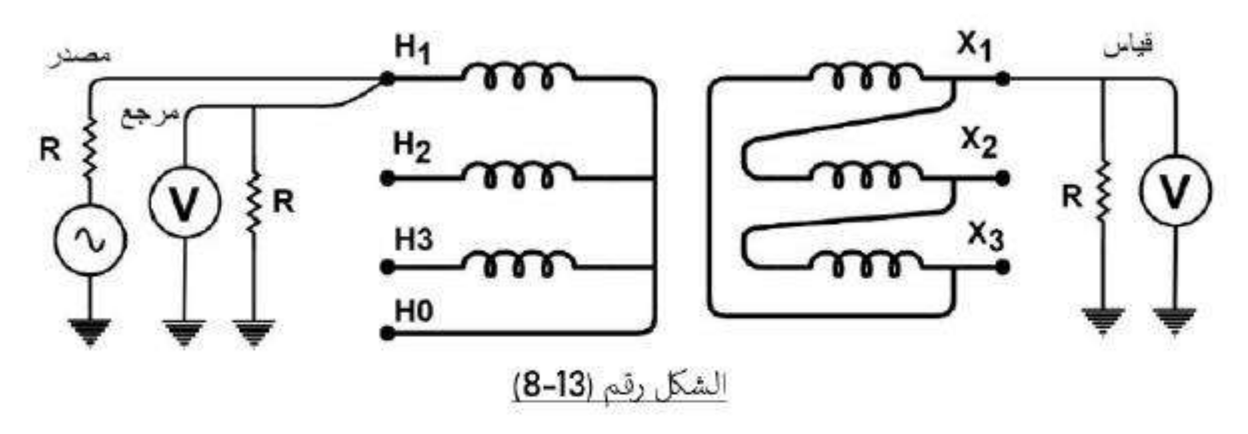


الشكل رقم **(8-12)**

4.3 الأسلوب الثالث: Capacitive inter-winding

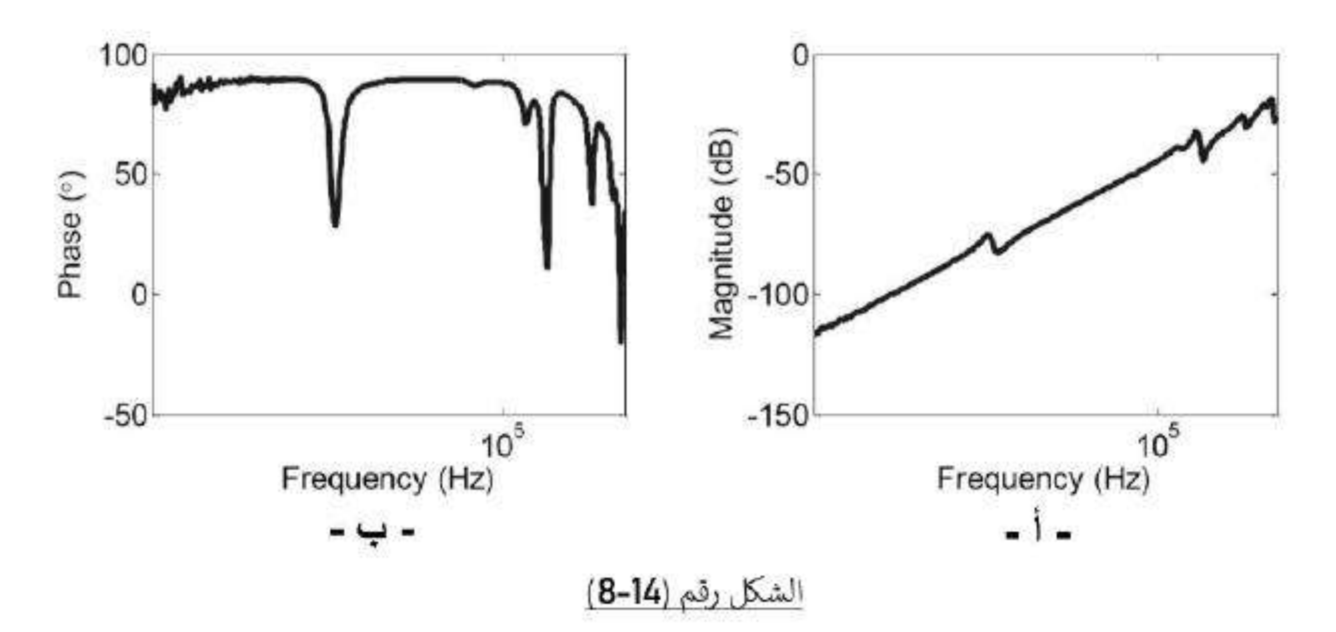
يُمكن تطبيق هذا الأسلوب على ملفات الفولتية المرتفعة **(HV)** أو المنخفضة **(LV)** للمحول سواء كانت موصولة على شكل مثلث **(Delta - Δ)** أو على شكل نجمة **(Star - Y)** مع عدم إمكانية تطبيقه على المحولات التلقائية **(Autotransformers)**، بحيث يتم تطبيق موجة الفولتية **(Input)** على أحد أطراف طور من أطوار الملف الإبتدائي ويتم قياس الموجة **(Output)** على أحد أطراف نفس الطور من الملفات

الثانوية مع الإبقاء على جميع أطراف الملفات المُتبقية مفتوحة (**Open circuit**) أو (**Floating**) كما هو مُبين في الشكل (**8-13**).



الشكل رقم (**8-13**)

في هذا الأسلوب تتأثر نتيجة الفحص بالمواسعة بين الملفات (**Inter-winding capacitance**) بحيث يُمكن الملاحظة في الشكل (**8-14**) والذي يُمثل نتيجة فحص نموذجية (**Typical**) أن قيمة الإستجابة (**response**) أو كما تُسمى رسمة السِعة (**Amplitude**) تكون منخفضة بالبداية نتيجة لقيمة المُعاوقة المرتفعة (**High Impedance**) و التي تكون بغالبيتها سعويّة (**Capacitive**)، فكما يظهر الشكل [(**8-14**) (**أ**)] يُمكن ملاحظة الإرتفاع في رسمة السِعة (**Amplitude**) مع التردد وكذلك غالبية رسمة الطور (**Phase**) الظاهرة في الشكل [(**8-14**) (ب)] ذات قيمة موجبة (**Positive**) مع إختلاف التردد وهذا يؤكد أن المُعاوقة المسيطرة على نتيجة الفحص غالبيتها سعويّة (**Capacitive**).

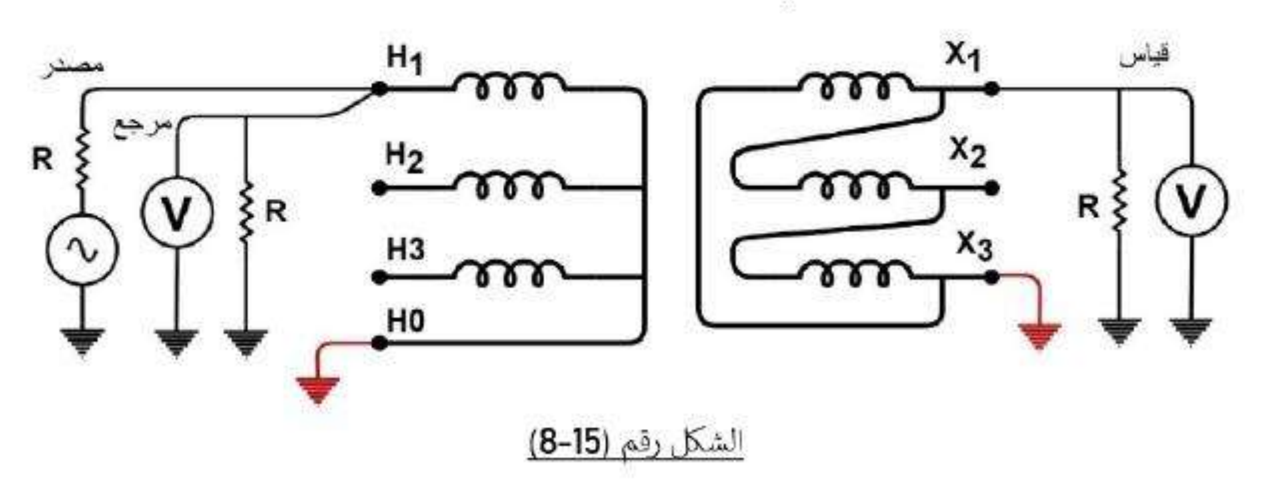


الشكل رقم (**8-14**)

وبما أن القيمة المُسيطرة على نتيجة الفحص هي المواسعة بين الملفات (**Inter-winding capacitance**) فإن هذا الفحص ذو حساسية مرتفعة في الكشف عن وجود تشوّه شعاعي/قُطري للملفات (**Winding radial deformation**)، ولكن يبقى هذا الأسلوب غير مُفضل لصعوبة تحليل نتائجه.

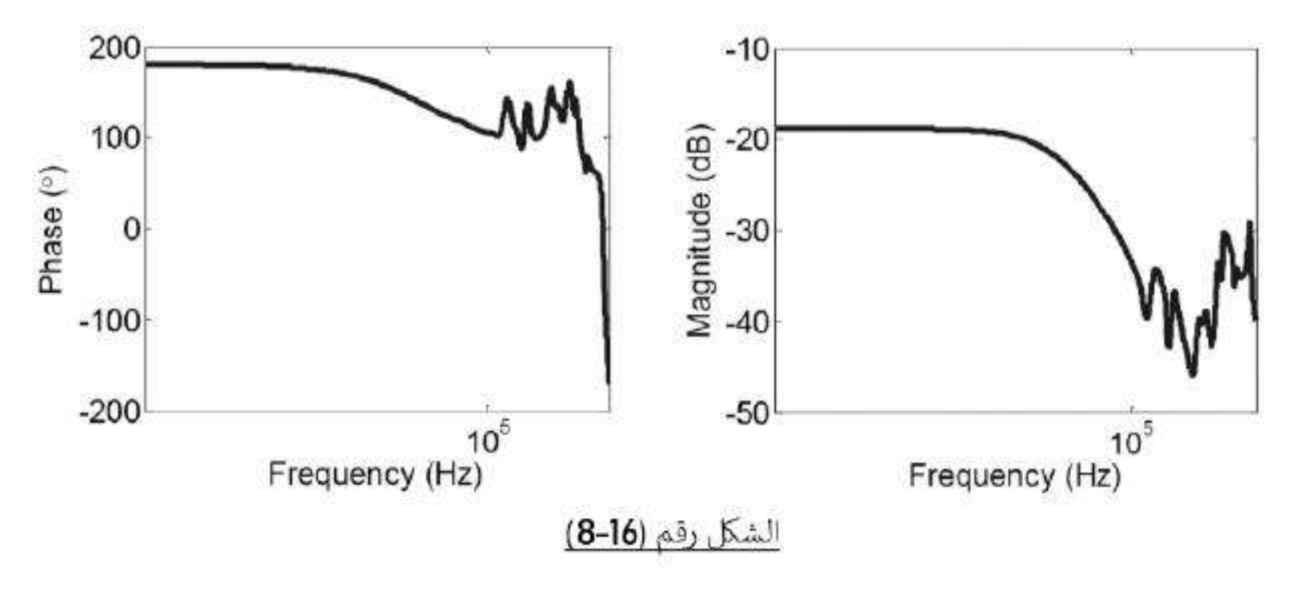
4.4 الأسلوب الرابع: Inductive inter-winding

في هذا الأسلوب يتم تطبيق موجة الفولتية (**Input**) على أحد أطراف طور من أطوار الملف الإبتدائي مع مراعاة تأريض طرفه الآخر ويتم قياس الموجة (**output**) على أحد أطراف نفس الطور من الملفات الثانوية مع مراعاة تأريض طرف الطور الآخر والإبقاء على جميع أطراف الملفات المُتبقية مفتوحة (**Open circuit**) أو (**Floating**) كما هو مُبين في الشكل (**8-15**).



الشكل رقم (8-15)

ويهدف الفحص بهذا الأسلوب لقياس نسبة الفولتية للمحول (**Transformer voltage ratio**) ويُمكن ملاحظة توصيلة الفحص الشبيه بتوصيلة فحص نسبة الفولتية آحادي الطور (**Per phase TVR**). فكما يظهر في الشكل (**8-16**) والذي يُمثل نتيجة فحص نموذجية (**Typical**) أن قيمة الإستجابة (**response**) أو رسمة السِعة (**Amplitude**) عند الترددات المنخفضة تُعبّر عن نسبة الفولتية (**Voltage ratio**) بين الملفات المفحوصة، أما للترددات المرتفعة فيُمكن إهمالها كونها لا تُعبّر عن أية نتائج مفيدة.



الشكل رقم (8-16)

عند إجراء هذا الفحص على المحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (**Three phase two winding**) فإنه يُمكن إجراء **15** فحص كما هو مبين بالجدول (**8-1**) والذي يُبين الأطراف التي يجب تطبيق الفولتية عليها وأيضاً التي يجب القياس عليها للمحولات ذات مجموعة التوصيل التي تكون فيها ملفات الفولتية المنخفضة متأخرة عن ملفات الفولتية الرتفعة بمقدار (**30°**) مثل (**Dyn1**) وغيرها من التوصيلات، حيث

أن المعيار الصادر عن معهد مُهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.149-2012]** يُوصي بإجراء **9** فحوصات منها على الأقل كما هو مُبين بالجدول التالي.

الجدول رقم **(8-1)**

Y - Δ LV lag HV by 30°	Δ – Y LV lag HV by 30°	رقم الفحص	أسلوب الفحص
H1 – H0	H1 – H3	1	End to End OC (HV Side) باقي الأطراف غير المذكورة تبقى مفتوحة
H2 – H0	H2 – H1	2	
H3 – H0	H3 – H2	3	
X1 – X2	X1 – X0	4	End to End OC (LV Side) باقي الأطراف غير المذكورة تبقى مفتوحة
X2 – X3	X2 – X0	5	
X3 – X1	X3 – X0	6	
H1 – H0	H1 – H3	7	End to End SC (HV Side) أطراف ملفات الفولتية المنخفضة يجب قصرها
H2 – H0	H2 – H1	8	
H3 – H0	H3 – H2	9	
H1 – X1	H1 – X1	10	Capacitive inter-winding باقي الأطراف غير المذكورة تبقى مفتوحة
H2 – X2	H2 – X2	11	
H3 – X3	H3 – X3	12	
H1 – X1	H1 – X1	13	Capacitive inter-winding تأريض أطراف الأطوار تحت الفحص وباقي الأطراف تبقى مفتوحة
H2 – X2	H2 – X2	14	
H3 – X3	H3 – X3	15	



ملحوظة (8-2): عادةً لتحديد نوع وعدد الفحوصات التي يجب إجراؤها للمحول، يُمكن الإعتماد على الفحص المرجعي الذي ستتم المُقارنة به وإجراء نفس الفحوصات لغايات المُقارنة.

أما فيما يَخُص المحولات ثلاثية الطور ثلاثية الملفات **(Three phase tertiary winding)** وباقي مجموعات التوصيل للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات يُمكن إيجاد المُلحق **(8-3)** والذي يضُم جدول بالفحوصات التي يُمكن إجراؤها لهذا النوع من المحولات وما يُنصح بإجراؤه على الأقل وفقاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **(IEEE)**.

5. خطوات الفحص

بعد التعرُّف على فلسفة الفحص وأساليبه وتوصيلاته يُمكن البدء بخطوات الفحص كالآتي:

5.1 عزل المحول كهربائياً (**Transformer De-energization**) مع مراعاة تطبيق نظام (إقفال مصادر الطاقة ووضع لافتات عليها) أو ما يُسمى بنظام التقافل (**Lock-out Tag-out LOTO**).

5.2 عزل نظام مكافحة الحريق بالماء (أو كما يُسمى نظام تبريد خزان المحول ومنع إنتشار الحريق) الخاص بالمحول المُراد فحصه خِشية عمل النظام بشكل خاطئ أثناء إجراء الفحص مما قد يؤدي لمخاطر القوس الكهربائي وما ينطوي عليه من مخاطر على الأشخاص أو المحول خاصة أثناء تطبيق الفولتية على المحول أو قد يؤدي الماء لتلف جهاز الفحص نفسه.

5.3 تطبيق كافة إجراءات السلامة الخاصة بإجراء الفحوصات الكهربائية المُضمّنة في معايير معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing]** والمعهد الوطني الأمريكي للمعايير **[ANSI National Electrical Safety Code]** ومُنظمة إدارة السلامة والصحة المهنية **[OSHA Specifications for Accident Prevention Signs and Tags]**.

5.4 فتح أطراف الفولتية المنخفضة (**LV side terminals**) والفولتية المرتفعة (**HV side terminals**) وذلك بإزالة الموصلات عنها (**Removing HV&LV Cables or Busbars**) وكذلك الحال بنقطة التعادل للمحول (**Neutral point**) إن وجدت. ويَعود السبب وراء ذلك لتجنُّب تأثير المواسعة الناتجة عن القضبان (**Busbars**) و الموصلات (**Cables**) على نتيجة هذا الفحص.

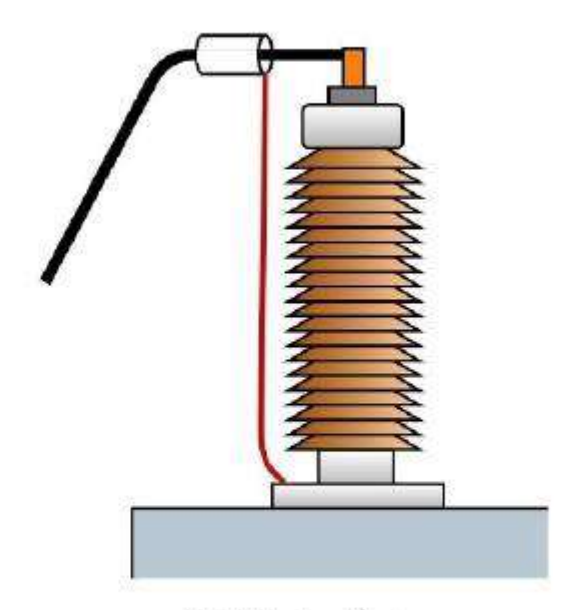
5.5 تفريغ الشحنات المُخزنة بملفات المحول (**Trapped Charges**) قبل توصيل كوابل الفحص وذلك بعمل دائرة قِصَر للملفات (**Short circuit**) وتأريضها لمدة من الزمن وكذلك الحال بعد الإنتهاء من الفحص وقبل إزالة كوابل الفحص. بالإضافة إلى التأكد من تأريض خزان المحول أثناء إجراء الفحص والإبقاء على تأريض القلب الحديدي (**Iron core**) ودعائم تثبيت القلب (**Core clamp**).



تحذير: يكون تأريض كوابل الفولتية المرتفعة إما عبر مُستعزلات التأريض الثابتة (**Earthing Dis-connector**) أو المتنقلة (**Portable**) قبل البدء بفك هذه الكوابل عن عوازل إختراق المحولات (**Bushings**)، وذلك لما قد تحويه من فولتية حثية (**Induction voltage**) ناتجة عن المُعدات أو الخطوط الهوائية (**Overhead Lines - OHL**) المجاورة للمحول المُراد فحصه والمشحونة بفولتيات مرتفعة.



ملحوظة (3-8): يجب التأكُّد من إستقامة كوابل التأريض الخاصة بغِلاف (**Sheath**) كوابل الفحص المحورية (**Coaxial**) كما هو مُبين بالشكل (**8-17**)، وأن تكون أقصر ما يُمكن مع مراعاة عدم لفها على شكل محاثة حتى لا تؤثر على نتيجة الفحص، وكذلك يُنصح بأن تكون من النوع (**Flat braid**).



الشكل رقم (8-17)



ملحوظة (4-8): يجب مراعاة أن تكون كوابل الفحص المحورية (**Coaxial cables**) نفس الطول وأن لا يزيد طولها عن (**30m**) متر وفقاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**).

5.6 في حال سبق إجراء هذا الفحص إجراء أي من الفحوصات التي تعتمد على الفولتية الثابتة (**DC**) مثل فحص مقاومة العازل (**Insulation resistance**) أو فحص مقاومة الملفات (**Winding resistance**)، يُنصح بإزالة المغناطيسية المُتبقة (**De-magnetization**) بالطُرُق الواردة في نهاية الفحصين سابقي الذِكر (الفصل الثاني و الثالث)، وذلك لأن نتيجة هذا الفحص تتأثر بقيمة المغناطيسية المُتبقية وتشبُّع القلب الحديدي للمحول.

5.7 تسجيل درجة حرارة المحول، عادةً ما يتم إعتماد درجة حرارة الزيت العلوي (**Top oil temperature**).

5.8 التأكد من وضعية مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) بحيث تكون عند الخطوة (**Tap**) التي تكون فيها كامل الملفات بالخدمة وعادةً ما تكون الخطوة رقم واحد (**Tap #1**)، بالإضافة إلى إمكانية إجراء هذا الفحص عند الخطوة (**Tap**) التي تكون فيها جميع ملفات مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) خارج الخدمة حسب معايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [**IEC, 60076-18 2012**] وهذا لمُغيرات الخطوة من النوع (**OLTC**)، أما فيما يخُص مُغيّرات الخطوة من النوع (**DETC or OCTC**) يُمكن إجراء الفحص عند الخطوة التي كان عليها المحول أثناء عمله الطبيعي أي كما وُجد.

5.9 بالرجوع لمعايير اللجنة الكهروتقنية الدولية [**IEC, 60076-18 2012**]، يُنصح قبل بدء الفحص بإجراء بعض التفقدات لجهاز الفحص إذا لزم الأمر وذلك للتأكد من موثوقيته ومن هذه التفقدات الآتي:

- (**Zero-check measurement**)
- (**Repeatability Check**)
- (**Instrument performance check**).

5.10 تحديد تردد الفحص:

بالرجوع لمعايير اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]** فإن أقل قيمة تردد قياس يجب أن تكون (**20 Hz**) هيرتز أو أقل، و أقل قيمة تردد مرتفع للمحولات ذات الفولتية الأكبر من (**72.5 kV**) كيلوفولت يجب أن تكون (**1 MHz**) ميجا هيرتز، و أقل قيمة تردد مرتفع للمحولات ذات الفولتية الأقل أو تساوي (**72.5 kV**) كيلوفولت يجب أن تكون (**2 MHz**) ميجا هيرتز.

5.11 عمل التوصيلة الخاصة بهذا الفحص وفقاً لأسلوب الفحص المُراد إجراؤه وكما هو موضح في فقرة أساليب الفحص السابقة.

5.12 لباقي خطوات الفحص بواسطة أجهزة الفحص الحديثة يُمكن الرجوع للملحق (**1-8**) الخاص بجهاز الفحص (**FRAX 99**) المُصنّع بواسطة شركة (**MEGGER**).

6. معلومات لا بُد من توافرها في تقرير الفحص

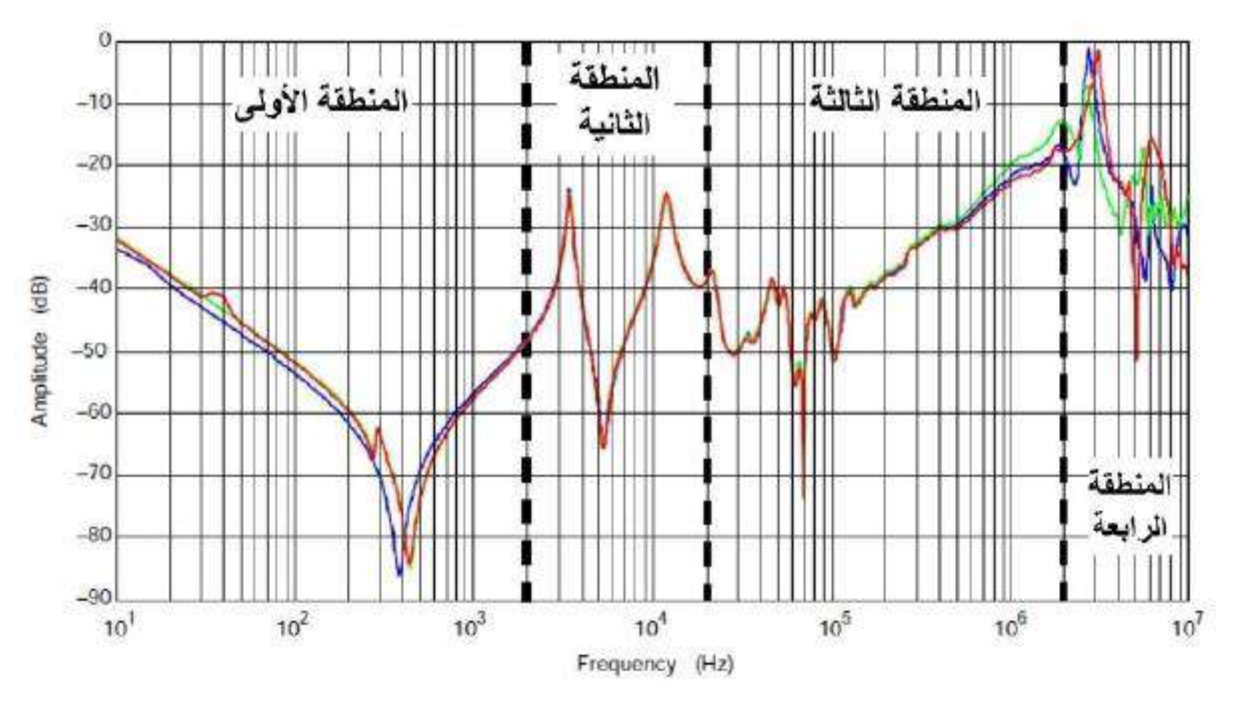
هنالك مجموعة من المعلومات لا بُد من توافرها في تقرير الفحص وذلك لغايات مقارنة الفحص مستقبلاً ولتأمين المعلومات اللازمة عن توصيلة الفحص عند إعادته مرة أُخرى، حيث سيتم ذِكر المعلومات الواجب توافرها (**required**) مع التذكير بوجود الكثير من المعلومات ولكن هذه أهمها كما وردت في المعيار الصادر عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات **[IEEE, C57.149-2012]**:

- ✓ مُصنّع المحول – **Transformer manufacture**
- ✓ رقم المحول التسلسلي – **Transformer serial number**
- ✓ البطاقة التعريفية للمحول – **Transformer ID**
- ✓ الشركة المالكة للمحول – **Company**
- ✓ موقعها – **Location**
- ✓ وضع زيت المحول (مفرغ أو مليء) – **Oil Status (immersed or not)**
- ✓ طول القضبان الموصول بعوازل الإختراق في حال تعذُّر فكها – **Length of busbars connected to the bushings**
- ✓ تاريخ ووقت إجراء الفحص – **Date and Time of measurements**
- ✓ وضعية مُغيّر الخطوة – **Tap changer position**
- ✓ نوع الفحص (دائرة مفتوحة أو مقصور أو حثي أو سعوي) – **Measurements type**
- ✓ فولتية الفحص – **Applied test voltage**
- ✓ الأطراف التي تم تطبيق الفولتية عليها والتي تم القياس عليها والتي تم تأريضها أو قصرها.

7. طبيعة نتائج الفحص

إن نتيجة هذا الفحص تكون على شكل مُخطط بياني يوضح تغيُّر نسبة الفولتية (**Volage ratio**) أو كما تُسمى بالسِعة (**Amplitude**) بوحدة الـ(**dB**) مع التردد (**Frequency**) بالهيرتز وهي الأكثر شيوعاً، وكذلك يُمكن التعبير عن هذا الفحص بمُخطط بياني لتغيُّر فرق الطور (**Phase difference**) بالدرجة (°) مع التردد (**Frequency**) بالهيرتز.

لذلك وقبل البدء بتفاصيل تحليل نتائج الفحص لا بُد من فهم طبيعة نتيجة هذا الفحص، فبالرجوع إلى أشهر المعايير والنشرات التقنية الصادرة عن كبرى المنظمات كمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**) والمجلس الدولي للأنظمة الكهربائية الكبيرة (**CIGRE**) واللجنة الكهروتقنية الدولية (**IEC**) فإن المُخطط الناتج عن هذا الفحص والخاص بنسبة الفولتية (**Voltage ratio**) أو السِعة (**Amplitude**) يُمكن تقسيمة لأربعة مناطق وفقاً للتردد كما هو مُبين في الشكل (**8-18**) الواردة في المِعيار **[IEC, 60076-18 2012]**، بحيث تحتوي كل منطقة على مجموعة من الملامح التي تتأثر بجزء من أجزاء المحول كالقلب الحديدي و مُفاعلة الملفات الحثية وعلاقة الملفات فيما بينها وملفات مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) والموصلات ونقاط التوصيل.



الشكل رقم (**8-18**)

7.1 المنطقة الأولى (منطقة الترددات المنخفضة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير بمحاثة القلب المغناطيسية (**Magnetizing inductance**) ومواسعة المحول الكُليّة، وتضم هذه المنطقة الترددات المنخفضة (الأقل من **2kHz**) كيلوهيرتز.

7.2 المنطقة الثانية (منطقة الترددات المتوسطة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير بعلاقة الملفات مع بعضها البعض أو ما يُسمى بالـ(**Winding interaction**) والمقصود هنا توصيلة الملفات فيما إذا كان المحول آحادي/ثلاثي الطور أو أن الملفات موصولة على شكل مثلث (**Delta – Δ**) أو نجمة (**Star – Y**) أو إذا كان المحول من النوع التلقائي (**Autotransformer**)، وتضم هذه المنطقة الترددات المتوسطة (**2 kHz – 20 kHz**) كيلوهيرتز.

للمحولات ثلاثية الطور ذات القلب الحديدي ثلاثي الأعمدة (**Core type**) فإن رسمة الطور الأوسط تحتوي على منطقة رنين عكسي (**Antiresonance**) واحدة مقارنة بالطورين الآخرين اللذان يحتويان على منطقتي رنين عكسي، ويَعود السبب في ذلك لتماثل مسارات المجال المغناطيسي داخل القلب (**Symmetrical reluctance paths**). كما وتَجدُر الإشارة إلى تأثُر هذه المنطقة بمقدار المغناطيسية المُتبقية في القلب الحديدي (**Core residual magnetization**).

7.3 المنطقة الثالثة (منطقة الترددات المرتفعة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير بِبُنية الملفات (**Winding structure**) والتي تكون على شكل محاثة تسرُب (**Leakage inductance**) ومواسعات على التوالي (C_S) وعلى التوازي (C_g)، علماً بأن المواسعات على التوالي تُعد الأكثر تأثيراً على شكل رسمة الإستجابة لهذا الفحص، وتضم هذه المنطقة الترددات المرتفعة (**20 kHz – 1 MHz**).

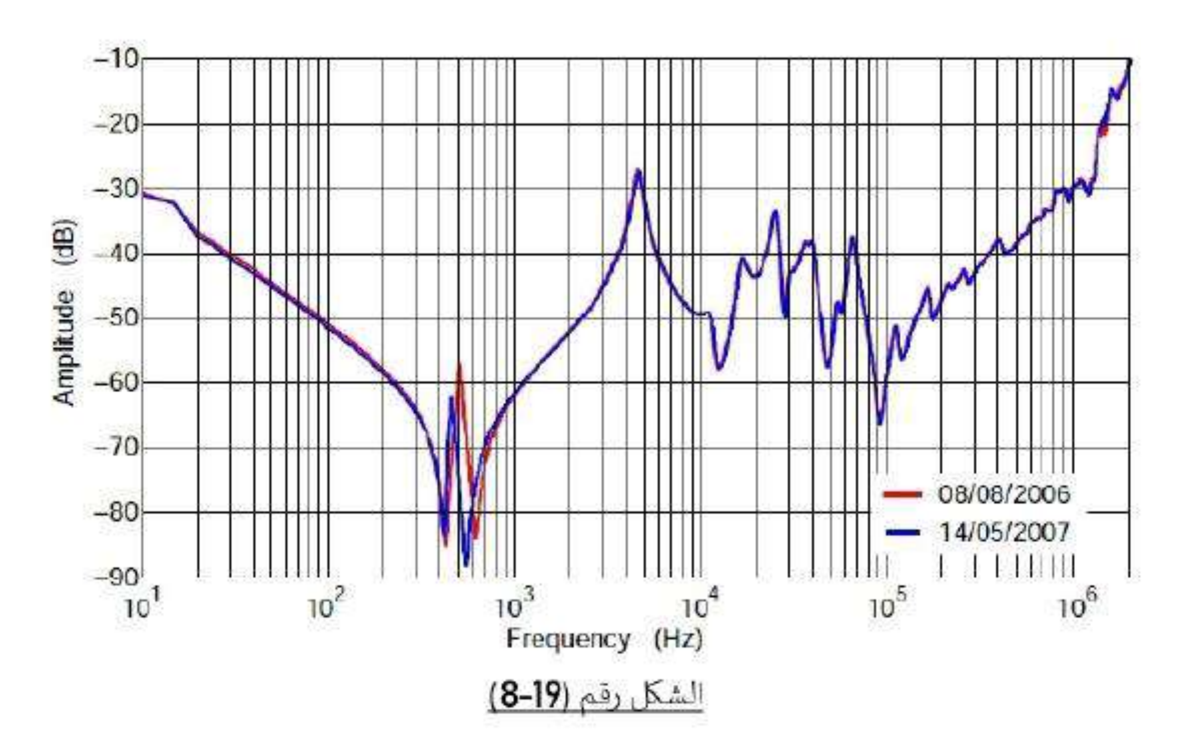
7.4 المنطقة الرابعة (منطقة الترددات بعد المرتفعة)

تتأثر هذه المنطقة بشكل كبير بتوصيلة الفحص خاصة توصيل الكوابل المحورية (**Coaxial cables**) المُستخدمة في الفحص بالأرض، وتَضُم هذه المنطقة الترددات الأكبر من (**1MHz**) ميجاهيرتز للمحولات ذات الفولتية الأكبر من (**72.5kV**) كيلوفولت والترددات الأكبر من (**2MHz**) للمحولات ذات الفولتية الأقل من أو تساوي (**72.5kV**) كيلوفولت.

8. تحليل نتائج الفحص

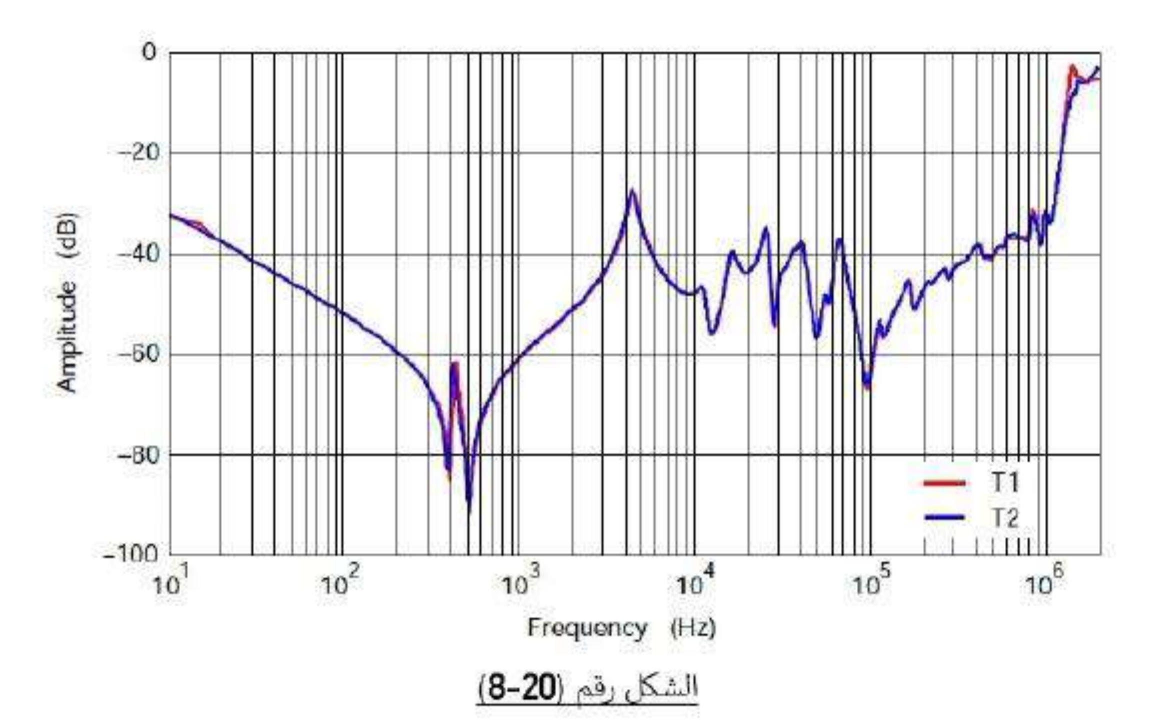
بالرجوع للمعايير الصادرة عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]** يُمكن إيجاد الطرق الأتية لتحليل نتائج هذا الفحص:

8.1 الطريقة الأولى: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحوصات القُبول المَصنعيّة (**Factory Acceptance Test – FAT**) أو المَوقعيّة (**Site Acceptance Test – SAT**) أو غيرها من القِيَم المرجعية كنتائج الفحوصات الروتينية السابقة (**Routine Test**) لهذا المحول كما هو مُبين بالشكل (**8-19**).



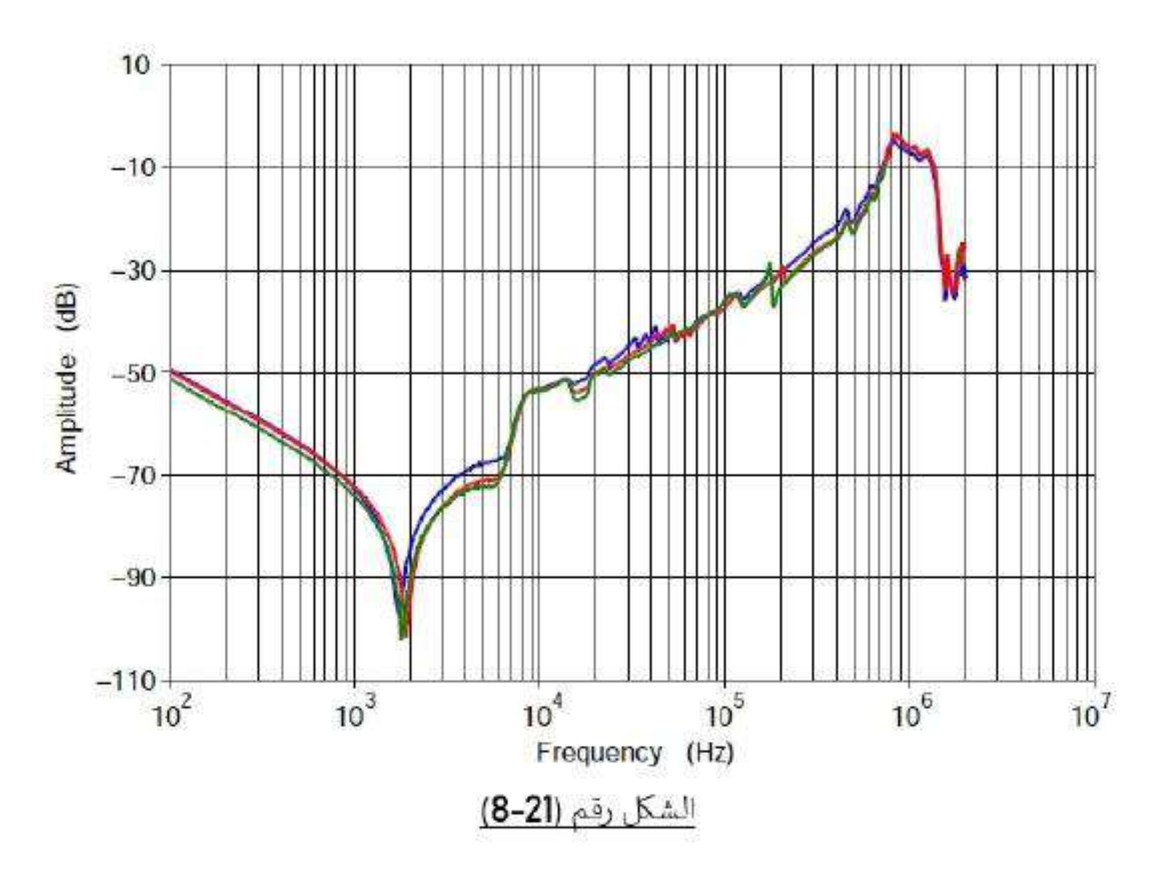
<u>الشكل رقم **(8-19)**</u>

8.2 الطريقة الثانية: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمحول مُشابه تماماً من نفس المُصنّع وله نفس المخططات الداخلية للمحول المفحوص وهو ما يُسمى بالمحول التوأم (**Twin transformer**) كما هو مُبين بالشكل **(8-20)**.



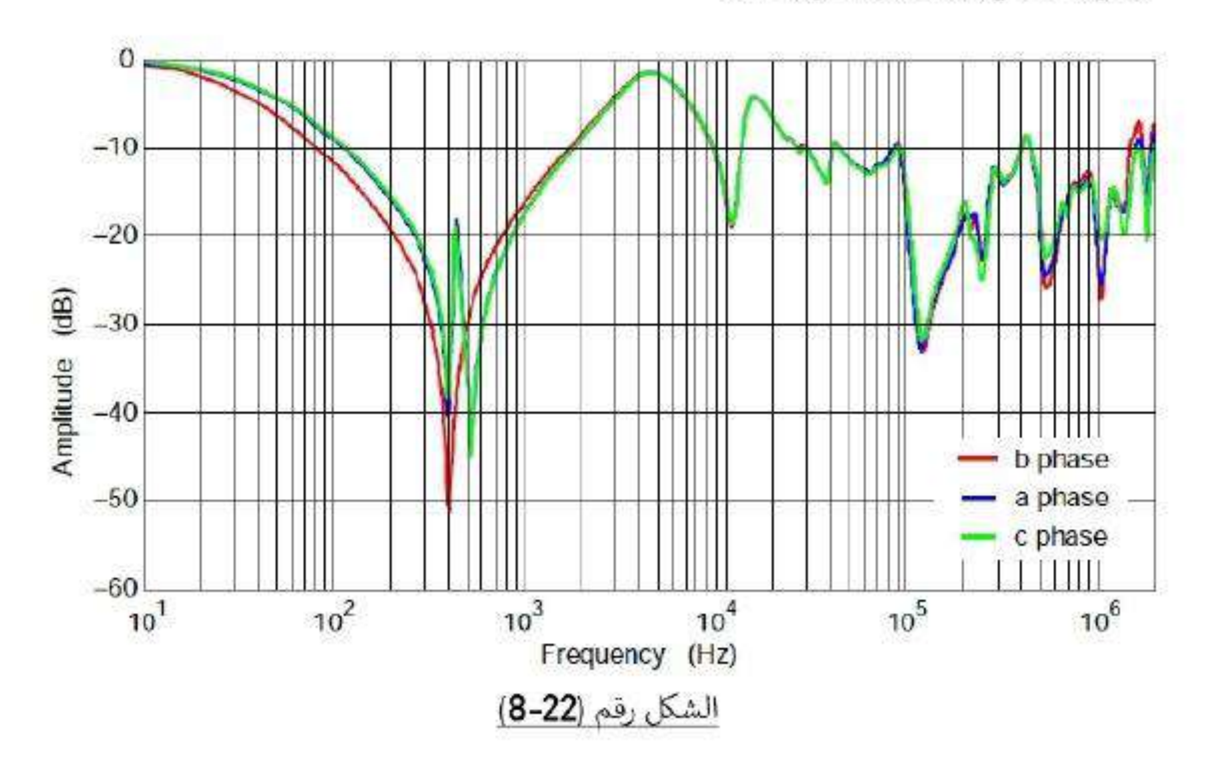
<u>الشكل رقم **(8-20)**</u>

8.3 الطريقة الثالثة: مقارنة نتائج الفحص بنتائج فحص لمحول مُشابه تماماً من نفس المُصنّع وله نفس المواصفات للمحول المفحوص ولكن قد يختلف بالتركيب الداخلي وهو ما يُسمى بالمحول الشقيق (**Sister transformer**) كما هو مُبين بالشكل **(8-21)**.



<u>الشكل رقم (**8-21**)</u>

8.4 الطريقة الرابعة: مقارنة نتائج الفحص بين الأطوار المختلفة للمحول كما هو مُبين بالشكل (**8-22**)، مع مراعاة وجود بعض الإختلافات الطبيعية بين رسمة هذه الأطوار ويعود السبب وراء ذلك لإختلاف أطوال موصلات هذه الأطوار بالإضافة لإختلاف المسافة الفاصلة بين ملفات الأطوار المختلفة وخزان المحول ولأسباب أخرى كثيرة.



<u>الشكل رقم (**8-22**)</u>

وبالرجوع لنفس المعيار [IEC, 60076-18 2012] يُمكن إيجاد بعض الأمور التي يجب ملاحظتها عند المقارنة بين النتائج الحالية والنتائج السابقة لنفس المحول أو لمحول مُشابه أو أثناء المُقارنة بين الأطوار وذلك لتحليل أمثل لنتيجة هذا الفحص ومن هذه المعايير:

- الإختلاف في الشكل العام لرسمة الإستجابة (**Frequency response**).
- إختلاف عدد مرات حدوث الرنين (**Resonance**) وهي القِيَم المرتفعة في الرسمة (**Maxima**)، بالإضافة لإختلاف عدد مرات حدوث الرنين العكسي (**Antiresonance**) وهي القِيَم المنخفضة بالرسمة (**Minima**).
- حدوث إزاحة للرسمة.

9. أمثلة على أنماط نتائج وفقاً لنوع العطل

تنوعت الأعطال الميكانيكية التي قد تُصيب الملفات أو القلب الحديدي للمحول وفقاً لنوع القوى الميكانيكية المؤثرة على المحول، فمنها ما قد يكون على شكل قوى كهرومغناطيسية ناتجة عن مرور تيارات عطل مرتفعة في الملفات ومنها ما هو ميكانيكي بحت كتعرُّض المحول للسقوط أو الصدمات.

لذلك أوردت المعايير الصادرة عن معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.149-2012] مجموعة من النتائج المُتوقعة في حال تعرُّض المحول للأنواع المختلفة من الأعطال الميكانيكية لملفاته أو قلبه الحديدي كالآتي:

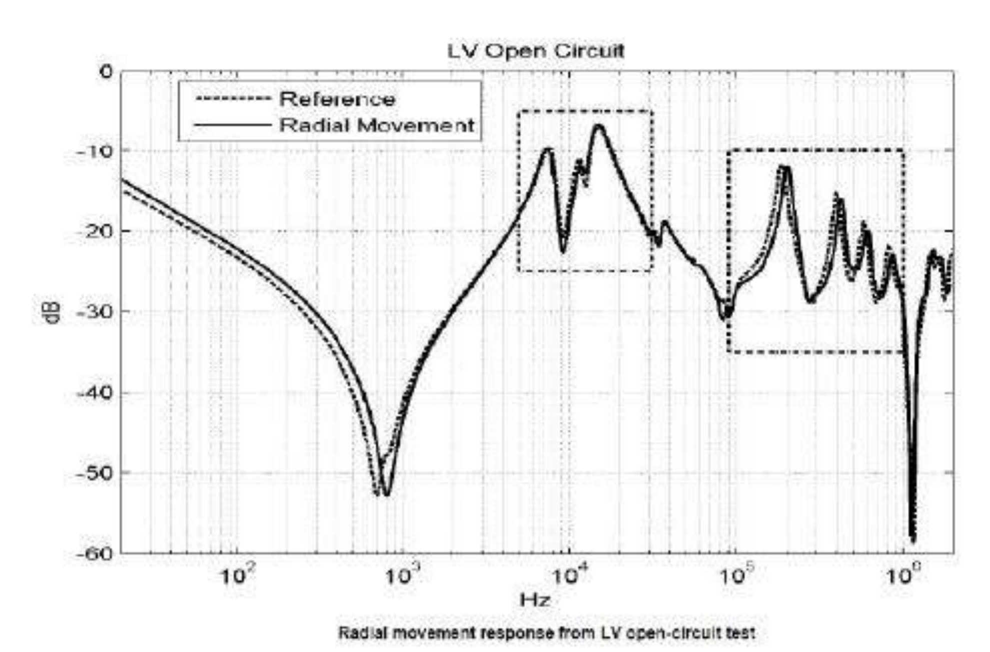
9.1 تشوّه الملفات الشُعاعي/القُطري – Radial winding deformation

عند تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فإن تأثيره على نتيجة الفحص تبعاً للتردد يكون كما هو موضح في الجدول (**8-2**) الآتي والأشكال (**8-23&24**)، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط **[IEEE, C57.149-2012]**:

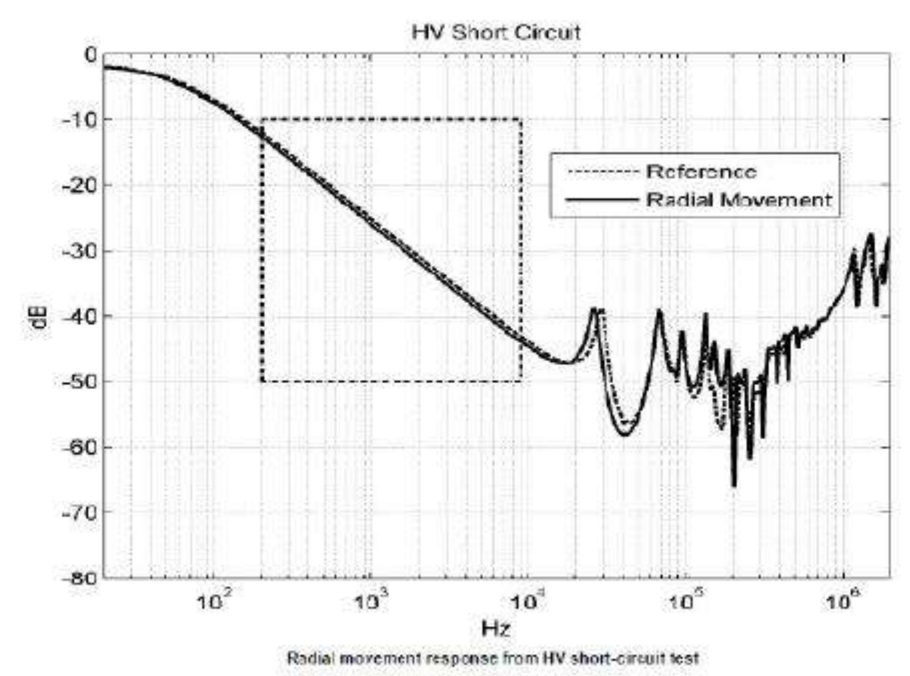
الجدول رقم (**8-2**)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – **End to End open circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوّه الملفات الشُعاعي/القُطري. - أسلوب الدائرة المقصورة – **End to End short circuit** قد يؤدي لإرتفاع المُعاوقة وما يصاحبه من إنخفاض طفيف في الرسمة.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** قد تحدث إزاحة للرسمة أو قد تظهر بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) تبعاً لخطورة وشدة التشوّه الذي حدث للملفات، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون صغير وقد يصعب كشفه.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit**

	قد تحدث إزاحة للرسمة أو قد تظهر بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) تبعاً لخطورة وشدة التشوّه الذي حدث للملفات، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون الأكثر وضوحاً لهذا النوع من الأعطال. مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة الملفات الأخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا تتأثر بتشوّه الملفات الشُعاعي/القُطري إلا في حالات تشوّه الملفات الكبير الذي قد يظهر في هذا النطاق.



الشكل رقم (8-23)



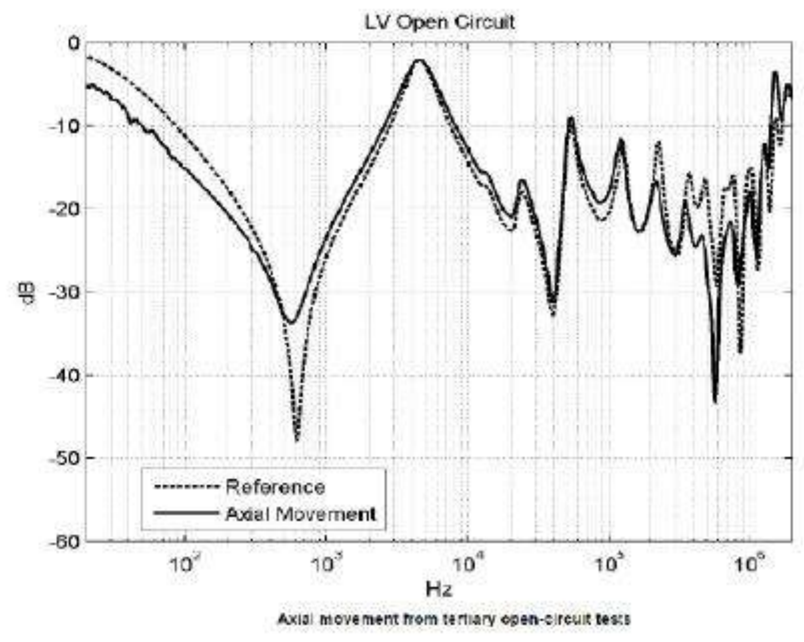
الشكل رقم (8-24)

9.2 تشوّه الملفات المِحوري – Axial winding deformation

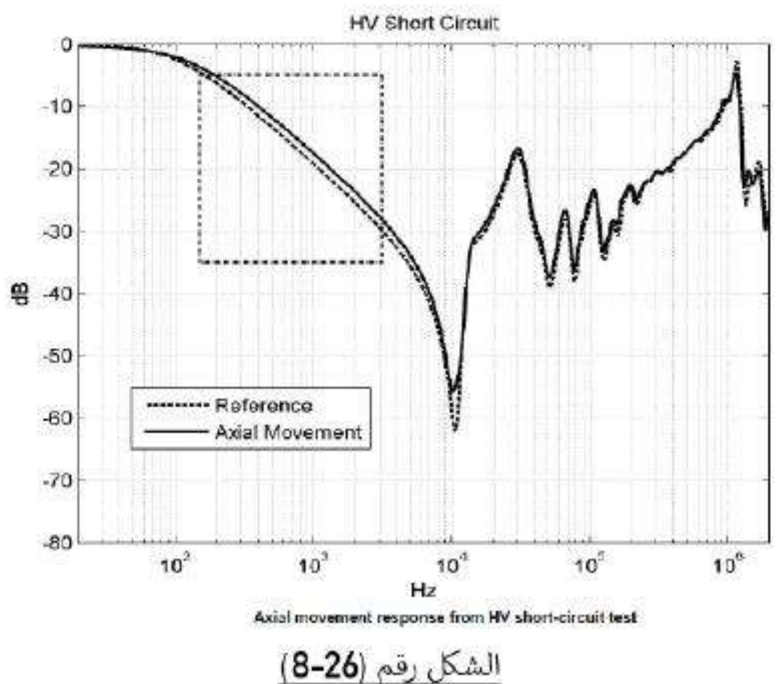
عند تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فإن تأثيره على نتيجة الفحص تبعاً للتردد يكون كما هو موضح في الجدول (**8-3**) الآتي والأشكال (**8-25&26**)، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط :[IEEE, C57.149-2012]

الجدول رقم (**8-3**)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – **End to End open circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوّه الملفات المِحوري. - أسلوب الدائرة المقصورة – **End to End short circuit** قد يؤدي لتغيُّر المُعاوقة وما يصاحبه من تغيُّر طفيف في الرسمة.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** قد تحدث إزاحة للرسمة أو قد تظهر بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) تبعاً لخطورة وشدة التشوّه الذي حدث للملفات، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون الأكثر وضوحاً لهذا النوع من الأعطال. مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة الملفات الأخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** قد تحدث إزاحة للرسمة أو قد تظهر بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) تبعاً لخطورة وشدة التشوّه الذي حدث للملفات، مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة الملفات الأخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا تتأثر بتشوّه الملفات المِحوري.



الشكل رقم (**8-25**)



الشكل رقم (8-26)

9.3 إزاحة كُلية للملفات – Bulk winding movement

عند تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فإن تأثيره على نتيجة الفحص تبعاً للتردد يكون كما هو موضح في الجدول (8-4) الآتي على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:

الجدول رقم (8-4)

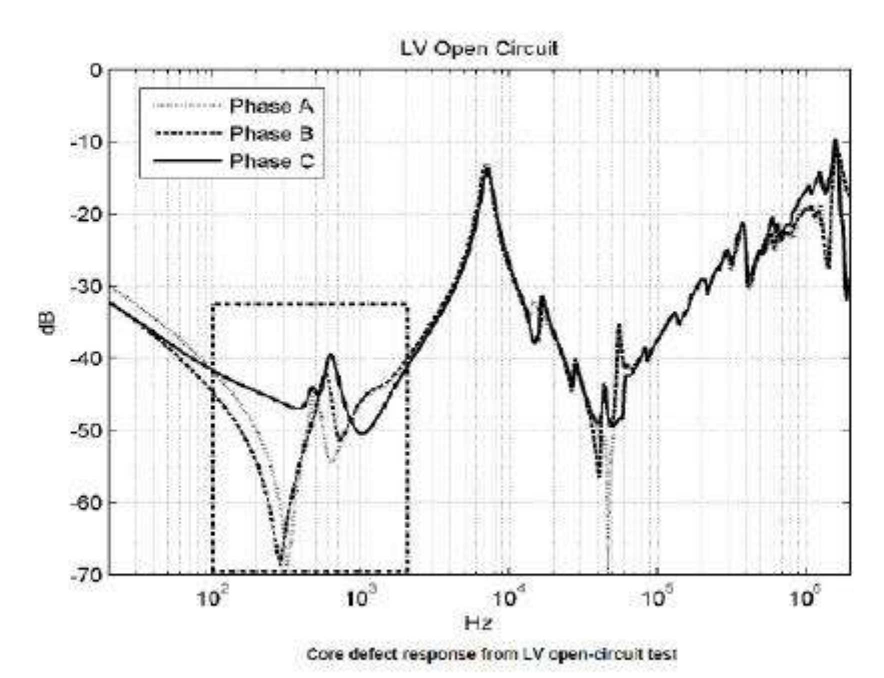
نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – **End to End open circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوّه الملفات. - أسلوب الدائرة المقصورة – **End to End short circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بتشوّه الملفات.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** ظهور بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) تبعاً لمقدار حركة الملفات (إزاحتها) علماً بأن هذه السمة تُعد الأبرز في حال حدوث هذا النوع من الأعطال بالإضافة إلى إحتمالية حدوث إزاحة للرسمة، حيث أن التأثير على هذا النطاق من الترددات يكون الأكثر وضوحاً لهذا النوع من الأعطال. مع إمكانية تأثير هذه النوع من الأعطال على نتيجة الملفات الأُخرى بدرجة أقل من الملفات المتعرضة للعطل.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بهذا النوع من الأعطال، مع إمكانية التأثير على منطقة الترددات المرتفعة من هذا النطاق في حال حدوث إختلاف للمواسعة (C_L).
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** حدوث إختلاف للمواسعة (C_L) قد يؤدي لإزاحة قِمم الرنين (**Resonance**).

9.4 أعطال القلب الحديدي – Iron core defects

عند تعرُّض القلب الحديدي للمحول للأعطال فإن ذلك يؤدي لتغيُّر دائرته المغناطيسية مما بدوره يؤدي لإختلاف نتيجة هذه الفحص ويتيح الكشف عن هذا النوع من الأعطال، حيث تتنوع أعطال القلب القلب الحديدي من حرق الرقائق المُكوَّنة للقلب الحديدي أو وجود دائرة قِصَر بين هذه الرقائق أو وجود نقاط تأريض متعددة غير مرغوب بها أو فقدان تأريض هذا القلب الحديدي وغيرها من الأعطال التي قد تؤثر على نتيجة الفحص تبعاً للتردد كما هو موضح في الجدول **(8-5)** الآتي والأشكال **(8-27&28)**، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط **[IEEE, C57.149-2012]**:

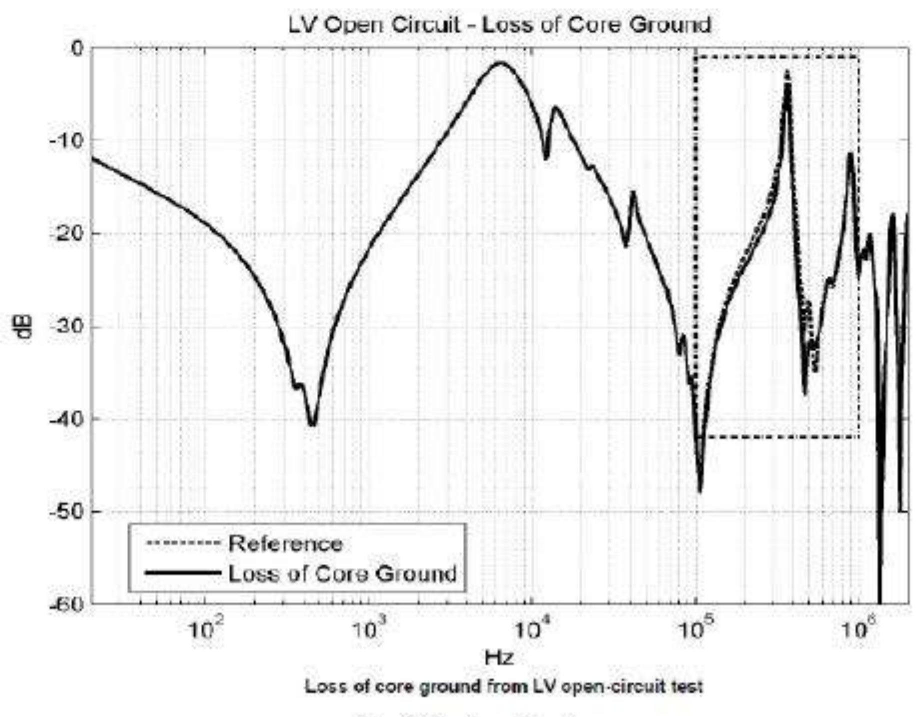
<u>الجدول رقم **(8-5)**</u>

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – **End to End open circuit** أعطال القلب الحديدي تؤثر على هذا النطاق من الترددات بالتحديد، ويكون التأثير على شكل إختلاف في شكل رسمة الإستجابة مع إحتمالية قليلة لحدوث إزاحة لرسمة الإستجابة. - أسلوب الدائرة المقصورة – **End to End short circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بأعطال القلب الحديدي.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** إحتمالية ظهور بعض قمم رنين **(Resonance)** أو إنخفاضات رنين عكسي **(Antiresonance)** أو إزاحة لرسمة الإستجابة.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بهذا النوع من الأعطال، مع إمكانية التأثير على منطقة الترددات المرتفعة من هذا النطاق (إزاحة لرسمة الإستجابة) في حال حدوث أعطال في تأريض القلب الحديدي.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** حدوث أعطال في تأريض القلب الحديدي قد يؤدي لإزاحة رسمة الإستجابة.



Core defect response from LV open-circuit test

<u>الشكل رقم **(8-27)**</u>



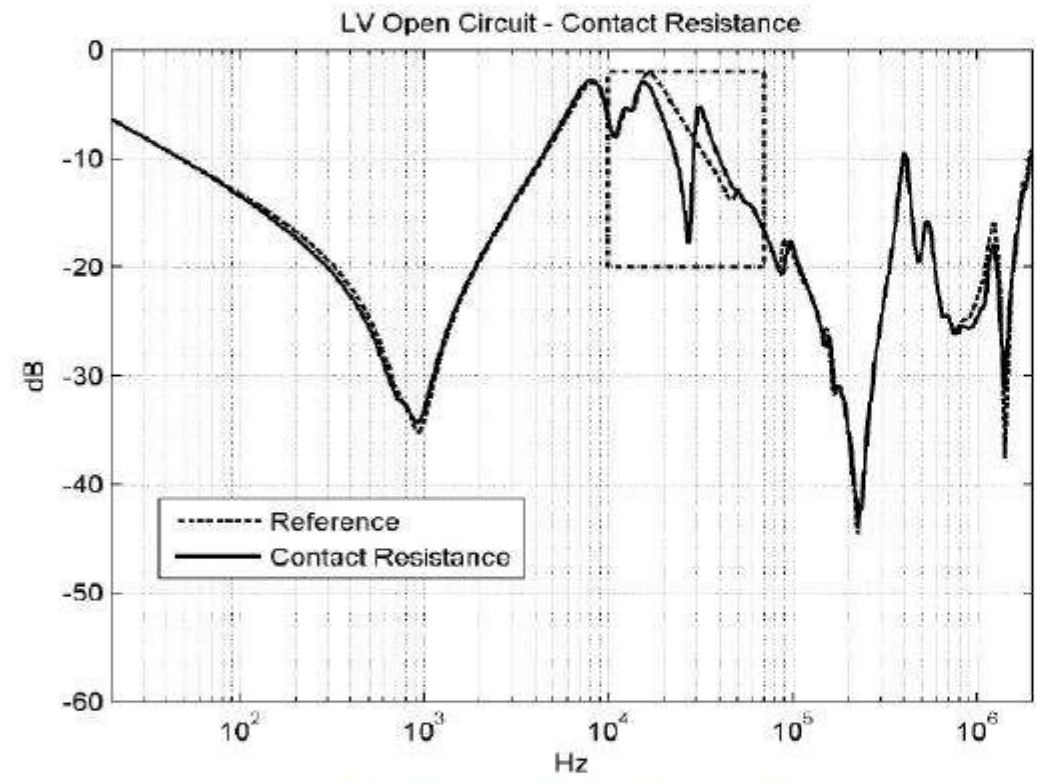
الشكل رقم (8-28)

9.5 مقاومة تلامس مرتفعة – High contact resistance

قد يحدث إرتفاع لقيمة مقاومة التلامس داخل المحول خاصة لنقاط إلتقاء الأسطح المعدنية ببعضها البعض نتيجة لإرتخائها أو تآكلها كنقاط إلتقاء موصلات عوازل الإختراق (**Bushing**) بالملفات أو نقاط إلتقاء موصلات مُغيّر الخطوة (**Tap changer**) بالملفات، ويكون تأثير هذا النوع من الأعطال على نتيجة الفحص كما هو موضح في الجدول (**8-6**) الآتي والأشكال (**8-29&30**)، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [**IEEE, C57.149-2012**]:

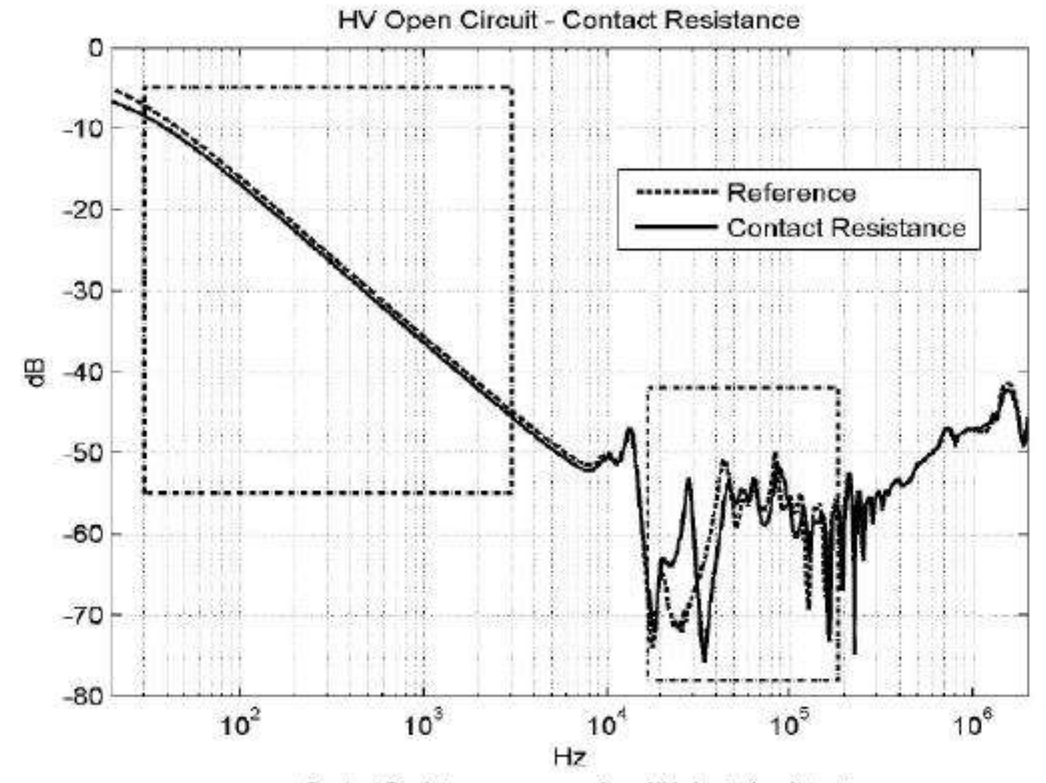
الجدول رقم (8-6)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – **End to End open circuit** بشكل عام هذا النطاق من الترددات لا يتأثر بقيمة مقاومة التلامس.
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) أو إزاحة لرسمة الإستجابة.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) أو إزاحة لرسمة الإستجابة.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) أو إزاحة لرسمة الإستجابة.



Contact Resistance response from LV open-circuit test

الشكل رقم (8-29)



Contact Resistance response from HV short-circuit test

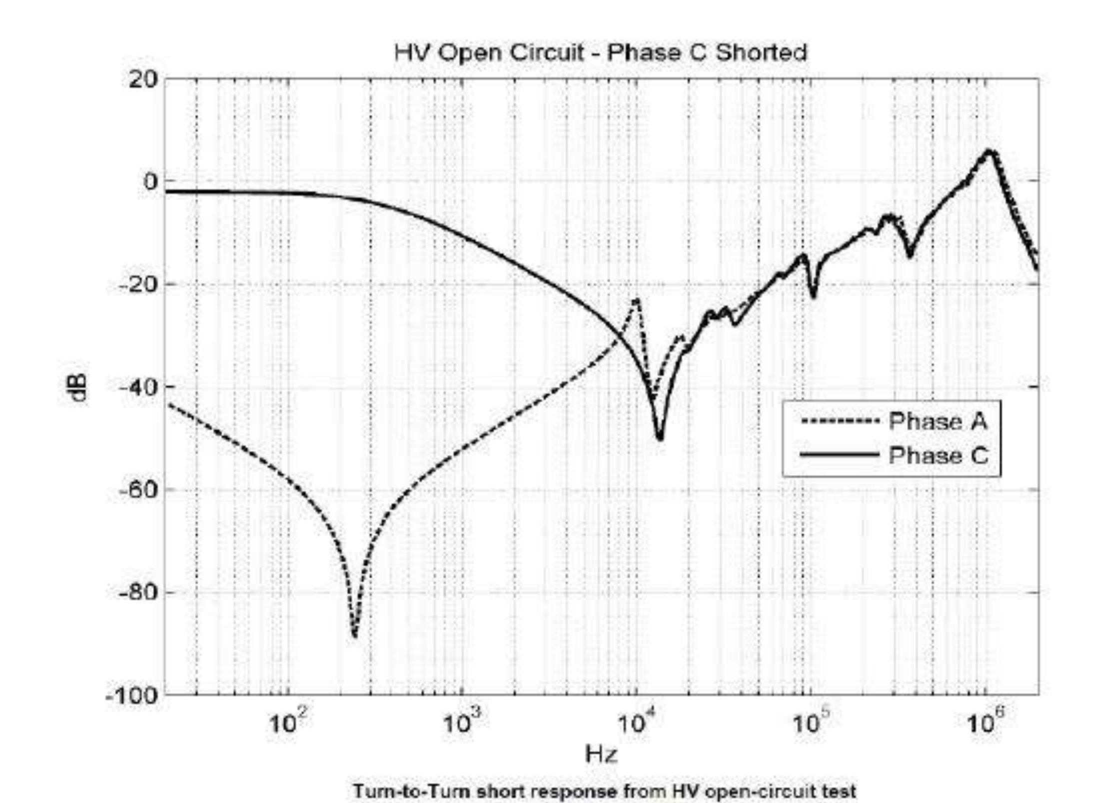
الشكل رقم (8-30)

9.6 قِصَر بين اللفات – Turn to turn short circuit

في حال تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال والذي يكون على شكل قِصَر بين اللفات من الطور الواحد أو بين اللفات من الأطوار المختلفة فإن ذلك من شأنه التأثير على نتيجة الفحص كما هو موضح في الجدول (8-7) الآتي والأشكال (8-31&32)، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط [IEEE, C57.149-2012]:

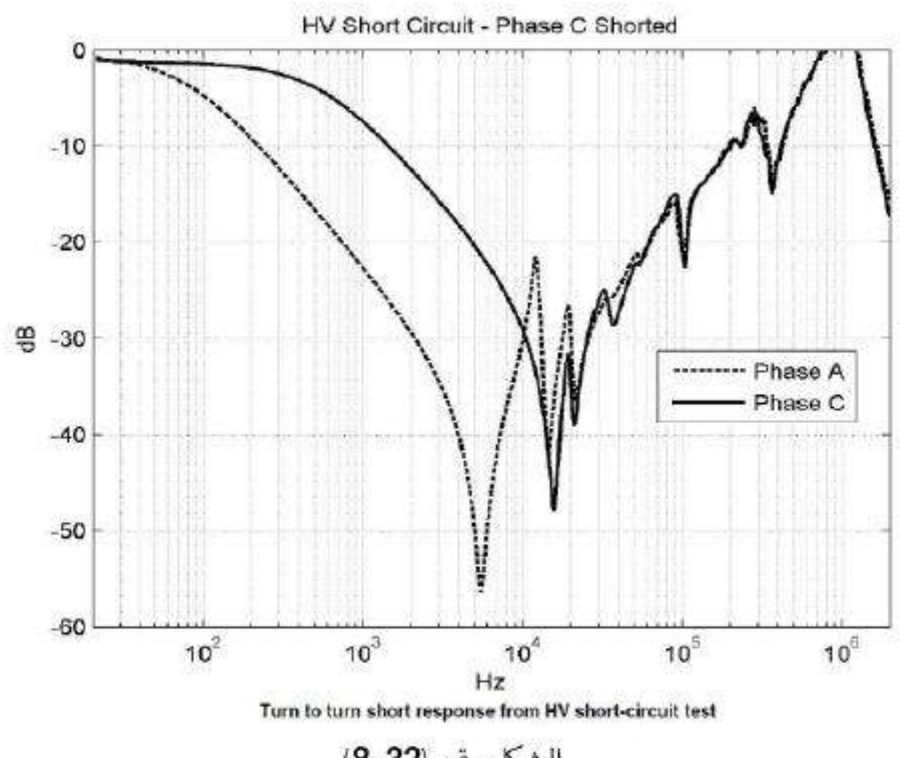
الجدول رقم (8-7)

نطاق التردد	التأثير على نتيجة الفحص
10Hz – 10kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة – **End to End open circuit** وجود هذا العطل سيُلغي تأثير القلب الحديدي على نتيجة الفحص ويصبح شبيه بنتيجة الفحص بأسلوب دائرة القِصَر (**SFRA – end to end short circuit**).
5kHz – 100kHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) أو إزاحة لرسمة الإستجابة.
50kHz – 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) أو إزاحة لرسمة الإستجابة.
أكبر من 1MHz	- أسلوب الدائرة المفتوحة والمقصورة – **End to End open/short circuit** إحتمالية ظهور بعض قمم رنين (**Resonance**) أو إنخفاضات رنين عكسي (**Antiresonance**) أو إزاحة لرسمة الإستجابة.



Turn-to-Turn short response from HV open-circuit test

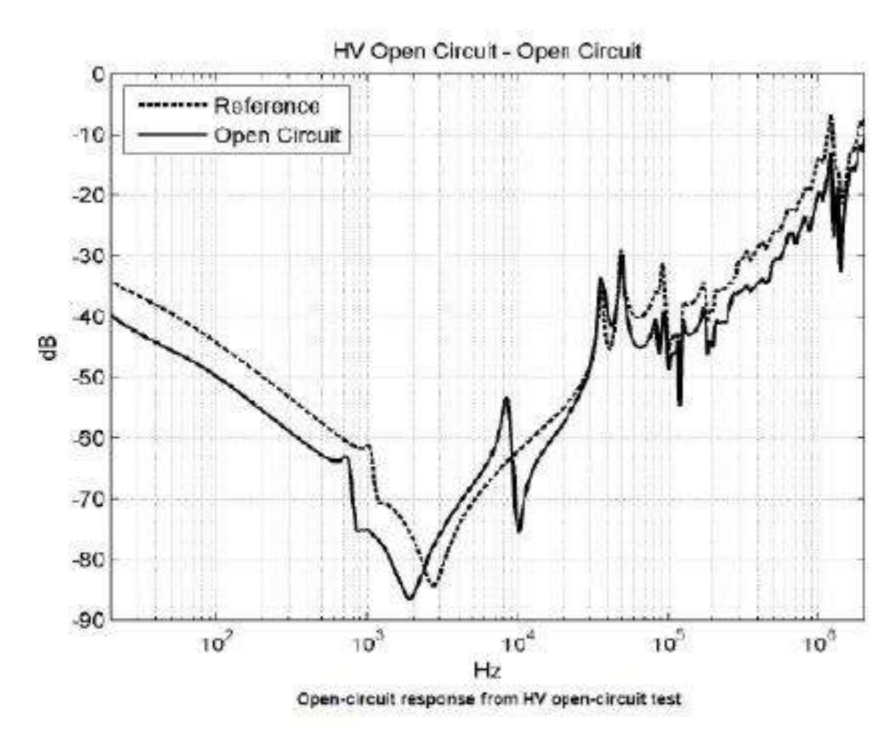
الشكل رقم (8-31)



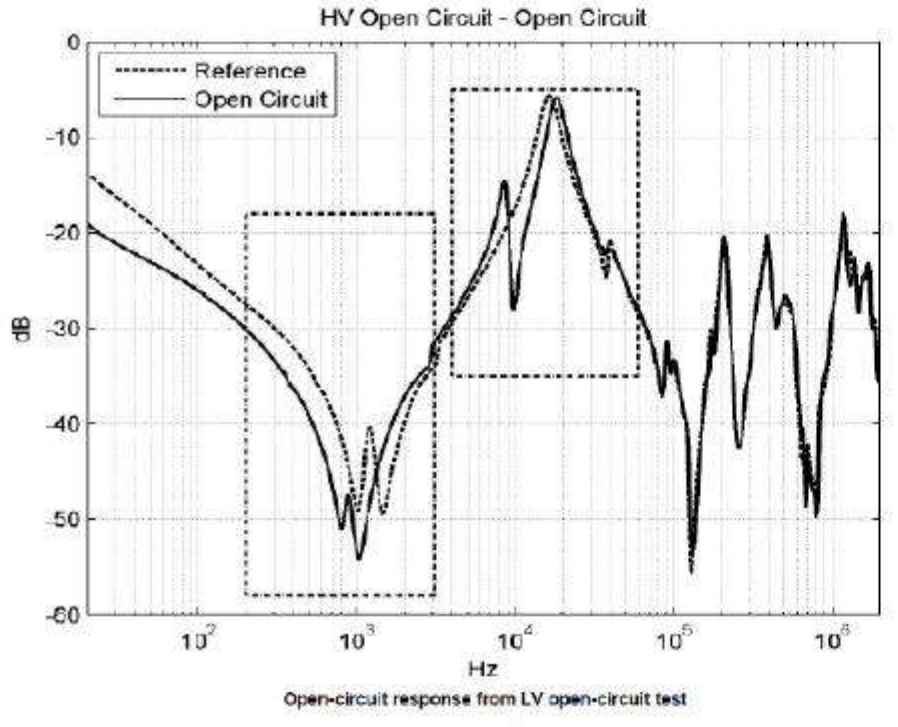
الشكل رقم (8-32)

9.7 قطع في دائرة الملفات – Winding open circuit

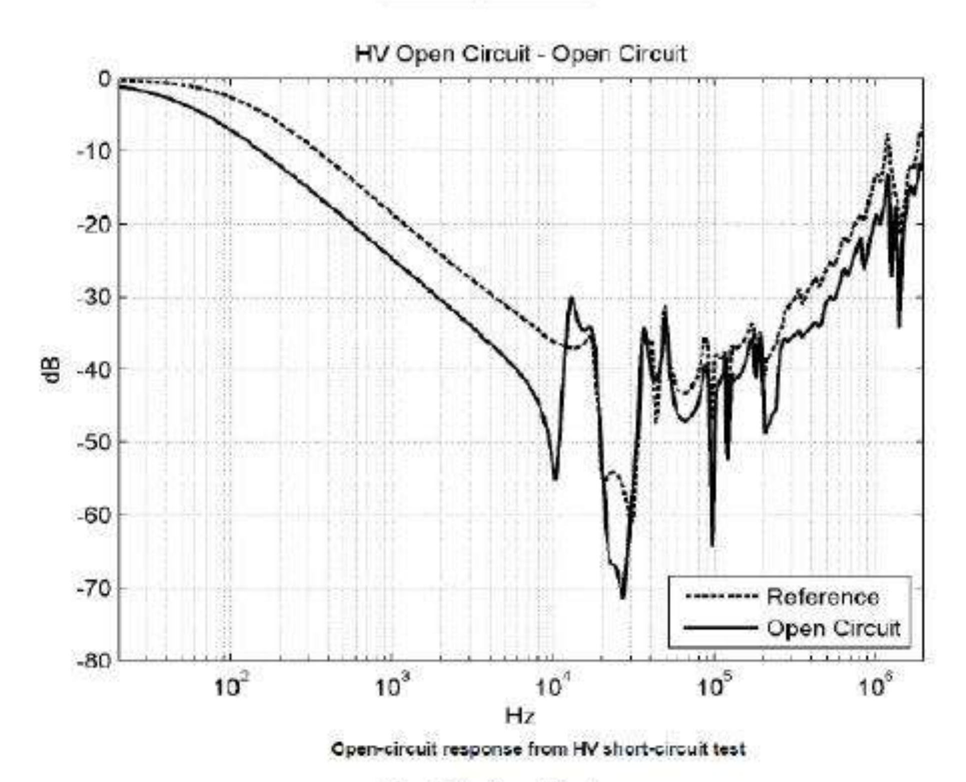
في حال تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فإن ذلك يؤدي لإرتفاع مُعاوقة **(Impedance)** الدائرة تحت الفحص وهذا من شأنه التأثير على نتيجة الفحص والذي يكون عادةً على شكل إزاحة لرسمة الإستجابة للأسفل نتيجة لإرتفاع قيمة المُعاوقة كما هو موضح في الأشكال (**8-33&34&35**)، على فرض تعرُّض المحول لهذا النوع من الأعطال فقط **[IEEE, C57.149-2012]**:



الشكل رقم (8-33)



الشكل رقم (8-34)



الشكل رقم (8-35)

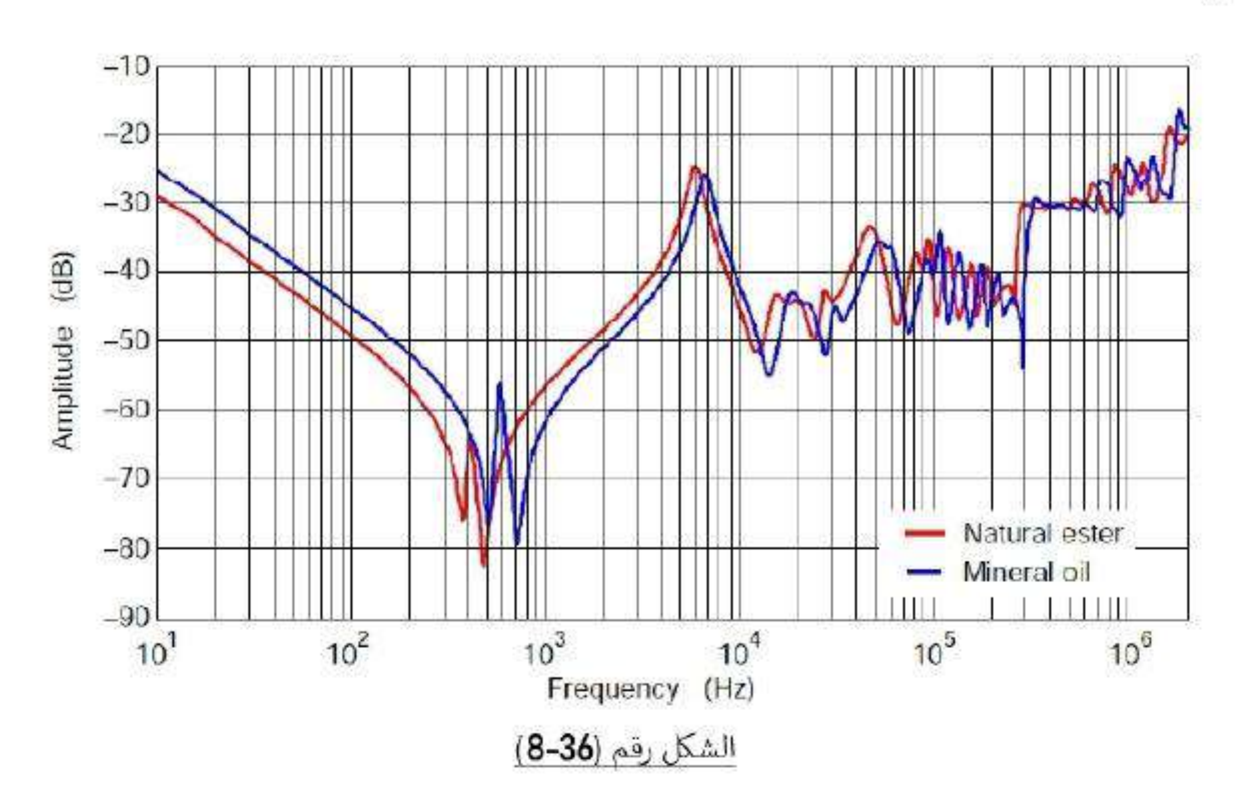
ولمزيد في هذا الخصوص يُمكن إيجاد المحلق (**8-2**) والذي يَضُم مُلخص لبعض أعطال المحولات وتأثيرها على نتيجة فحص الإستجابة الترددية وفقاً لمجموعة من المعايير والدراسات والنشرات الفنية كما ورد **[Mohd Yousof, Frequency Response Analysis for Transformer Winding Condition Monitoring – University of Queensland]**.

10. العوامل المؤثرة على نتيجة الفحص

هنالك عدة عوامل مؤثرة على نتيجة هذا الفحص والتي لا بُد من الإحاطة بها من أجل تحييد تأثيرها أو التخفيف منه على الأقل أو أخذها بعين الإعتبار عند تحليل نتائج هذا الفحص، ومن هذه العوامل:

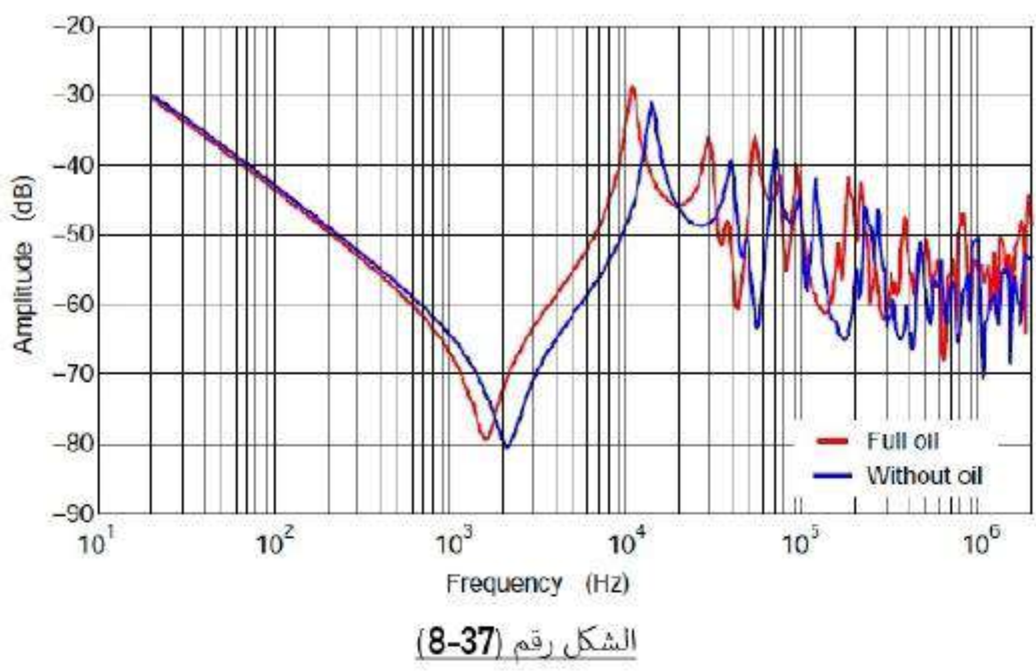
10.1 تأثير زيت المحول - Transformer oil effect

كما هو معلوم أن نفاذية الزيت المعدني (**Mineral oil permittivity**) تختلف عن نفاذية الزيت النباتي (**Natural Ester**) وكذلك عن نفاذية الهواء، حيث أن نفاذية الزيت النباتي (**Natural Ester**) مرتفعة مقارنة بنفاذية الزيت المعدني (**Mineral oil**) مما يزيد من المواسعة الكُليّة للمحول وهذا بدوره يُقلل من قيمة ترددات الرنين (**Resonance frequencies**) والذي من شأنه عمل إزاحة لرسمة الإستجابة (**Frequency response**) نحو الترددات المنخفضة كما هو مُبين في الشكل (**8-36**) الذي يوضح إختلاف نتيجة فحص (**SFRA**) تبعاً لنوع الزيت المستخدم في المحول فيما إذا كان زيت نباتي (**Natural ester**) أو زيت معدني (**Mineral oil**) كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]**.



الشكل رقم (**8-36**)

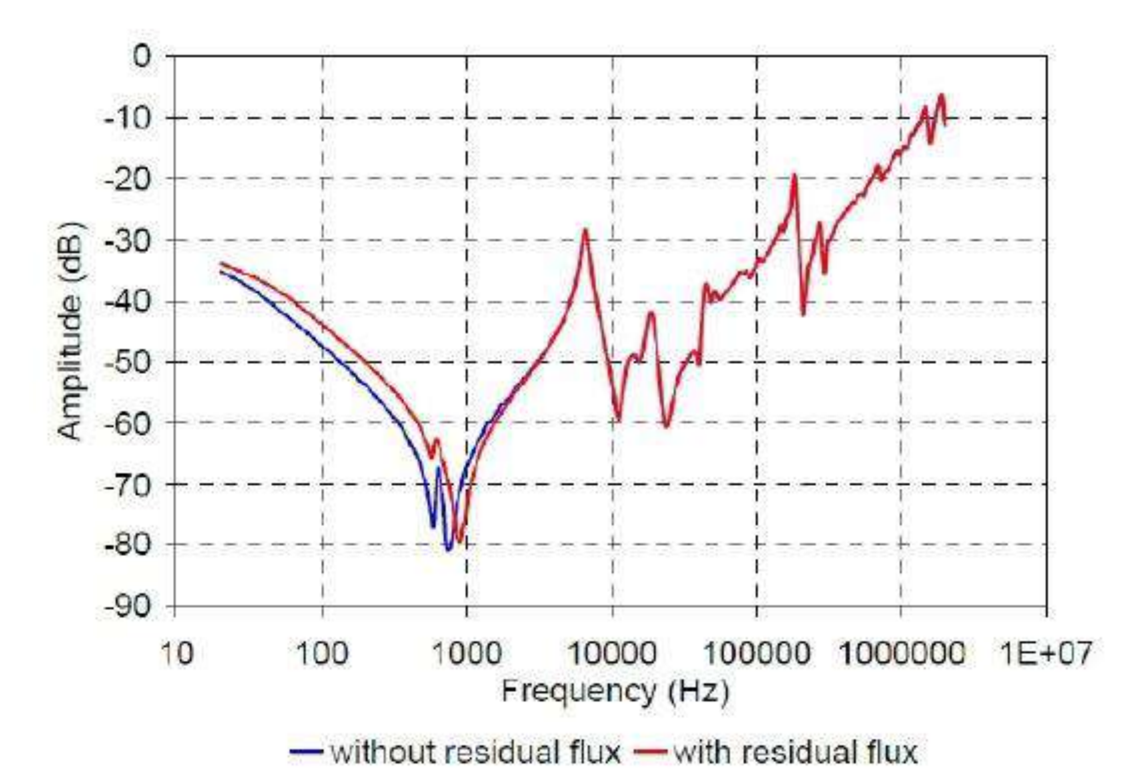
الشكل (**8-37**) يوضح إختلاف نتيجة فحص (**SFRA**) لمحول في حال كان مُفرغ من الزيت وفي حال إحتوائه على الزيت العازل كما ورد في المعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]**.



الشكل رقم (**8-37**)

10.2 تأثير مغناطيسية القلب الحديدي المُتبقية – Core residual magnetism effect

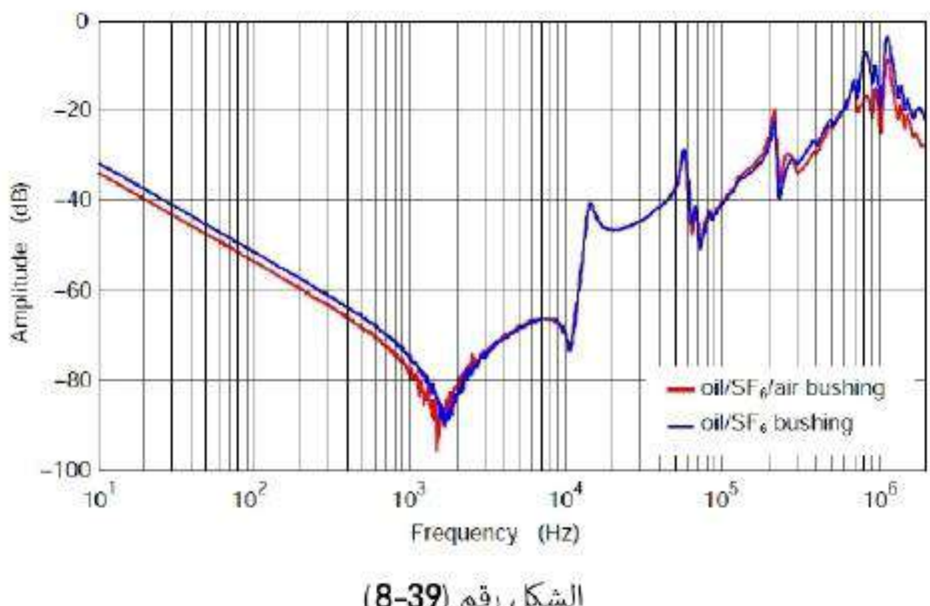
إن مغناطيسية القلب المُتبقية من شأنها التأثير على نتيجة هذا الفحص للترددات الأقل من (**5kHz**)، والشكل (**8-38**) يوضح نتيجة فحص (**SFRA**) لمحول قبل وبعد إجراء فحص مقاومة الملفات الذي من شأنه بناء مغناطيسية مُتبقية في القلب الحديدي، حيث يَظهر تأثير هذه المغناطيسية المُتبقية على الترددات المنخفضة، أما للترددات المرتفعة فإن نتيجة الفحص مُتطابقة كما ورد في المِعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية [**IEC, 60076-18 2012**].



الشكل رقم (**8-38**)

10.3 تأثير عوازل الإختراق – Transformer bushings effect

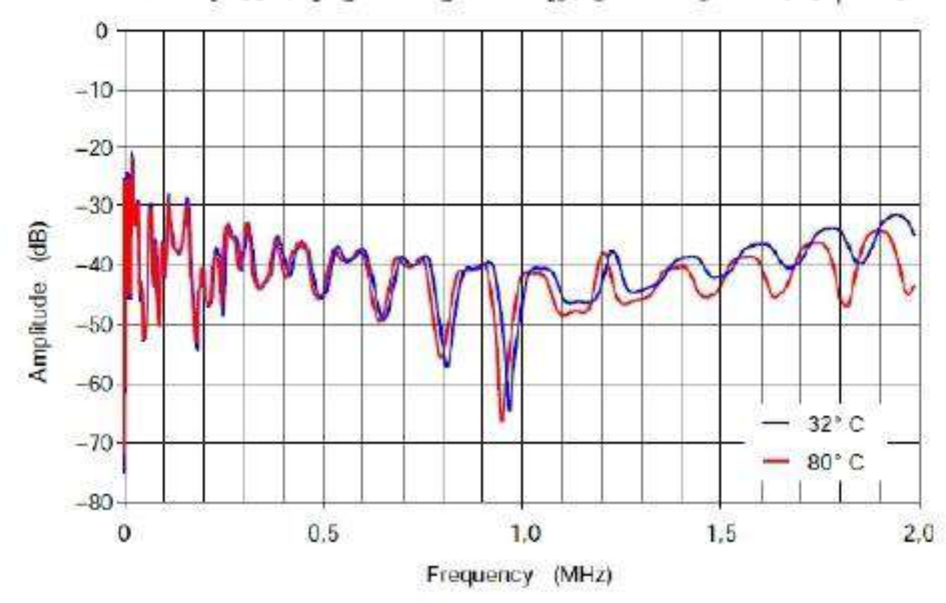
عادة ما يتم إستخدام عوازل إختراق (**Bushings**) أثناء الفحص المصنعي لغايات الفحص فقط، تختلف عن نظيرتها التي يتم تركيبها في الموقع مما يولد إختلاف في نتيجة الفحص خاصة للترددات المرتفعة كما يظهر في الشكل (**8-39**) كما ورد في المِعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]**.



<u>الشكل رقم (**8-39**)</u>

10.4 تأثير درجة الحرارة – Temperature effect

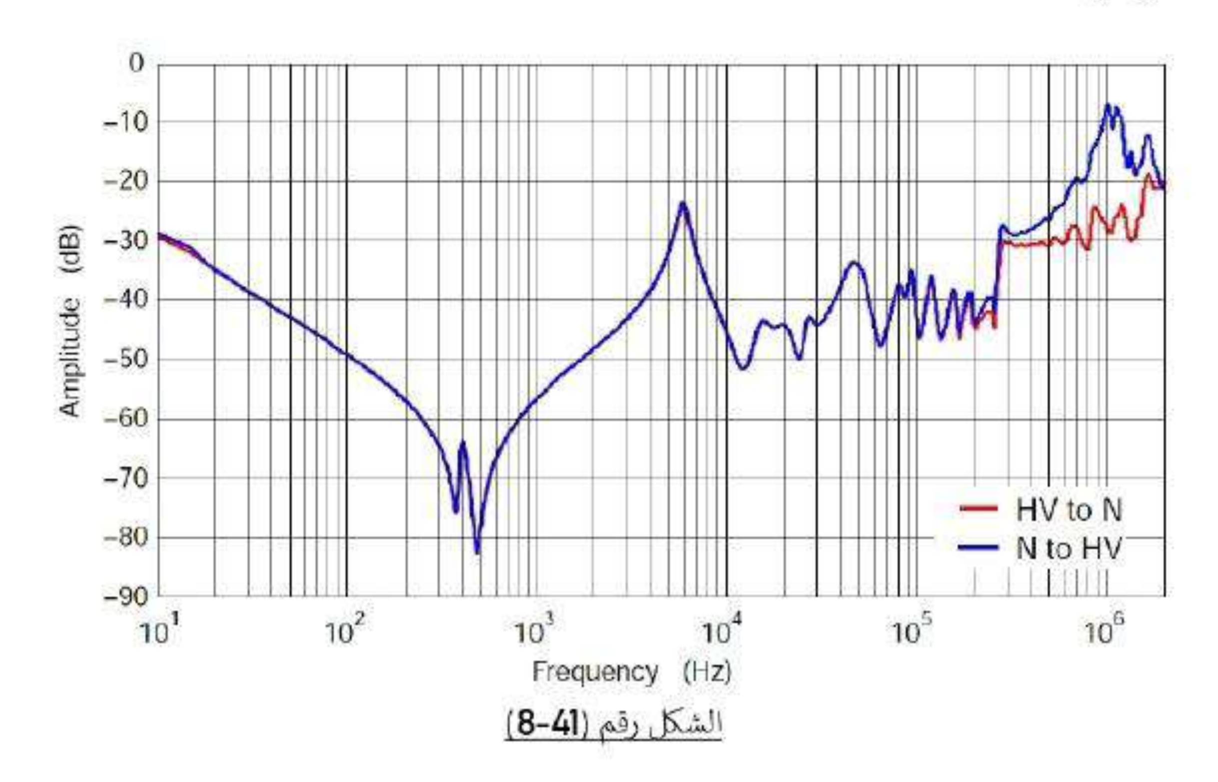
إن التغيُّر في درجة الحرارة يؤثر على نتيجة هذا الفحص خاصة إذا كان هذا التغيُّر اكثر من (**50°**) درجة مئوية كما هو مُبين في الشكل (**8-40**) كما ورد في المِعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]**، حيث أن التغيُّر في درجة الحرارة يُصاحبه تغيُّر في مقاومة ملفات المحول بالإضافة لتغيُّر في كثافة وحجم وثابت العزل الخاص بزيت المحول مما يؤدي بدوره لإختلاف نتيجة هذا الفحص.



<u>الشكل رقم (**8-40**)</u>

10.5 إتجاه القياسات – Measurement direction

كما ذُكر سابقاً أن إتجاه الفحص (تطبيق موجة الفحص على أطراف الخط (**Line**) وقياسها من نقطة التعادل (**Neutral**) أو العكس) لا يؤثر على نتيجة الفحص وذلك عند فحص الملفات الموصولة على شكل نجمة (**Star / Y**)، ولكن هذا لا يعني عدم وجود إختلاف في نتيجة الفحص خاصة للترددات المرتفعة كما هو مُبين في الشكل (**8-41**) كما ورد في المِعيار الصادر عن اللجنة الكهروتقنية الدولية **[IEC, 60076-18 2012]**، لذلك يُنصح بإستخدام نفس توصيلة الفحص المستخدمة في الفحوصات السابقة المُراد المقارنة بها.



الشكل رقم (8-41)

11. فحوصات إضافية داعِمة

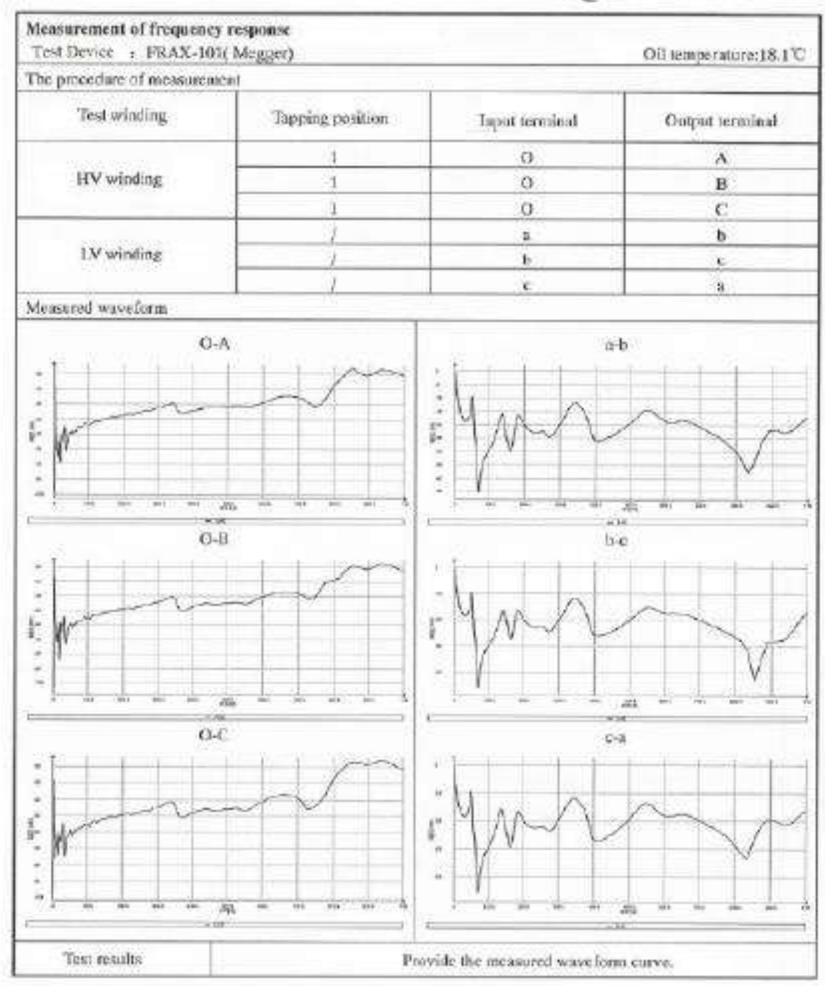
تُعتبر المحولات من المُعدات ذات الأهمية القصوى في المنظومة الكهربائية لما لها من دور في ديمومة سريان التيار الكهربائي عن طريق ربط عناصر المنظومة الكهربائية جميعها بالإضافة إلى تكلفتها المادية المرتفعة، لذلك لا يُمكن الإعتماد على فشل فحص واحد لتقييم حالة المحول والبدء بعمل الإجراءات التصحيحية لهذا المحول، بل يجب عمل فحوصات أخرى من شأنها تأكيد ما تم الكشف عنه في هذا الفحص و تحديد نوع العُطل بالضبط ثم بعد ذلك يُصار لعمل الإجراء التصحيحي اللازم لهذا المحول و الذي قد يتطلب التواصل مع مُصنّع هذا المحول.

فعند إجراء فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (**SFRA**) وكانت نتائج الفحص غير مُرضية بعد تحليلها وفقاً لما تم شرحه سابقاً، فإنه يجب إعادة الفحص بعد التأكد من جميع خطوات الفحص ومراعاة تجنُّب الأمور التي تؤثر على نتيجة هذا الفحص، وفي حال الحصول على نتيجة أُخرى غير مُرضية لا يُنصح بوضع المحول بالخدمة قبل عمل تفقد داخلي بالإضافة إلى عمل الإجراءات التصحيحية اللازمة ولكن لا بُد من إجراء بعض الفحوصات الأُخرى وفقاً لنوع العطل المُكتشف من خلال هذا الفحص فيما إذا كان يخص الملفات أو القلب الحديدي أو غيرها من الأعطال كالآتي:

- **فحص الفولتية المنخفضة النَبضي/الدَفعي - (Low Voltage Impulse (LVI)؛** وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول.
- **فحص مُفاعلة التسرُب – Leakage Reactance test؛** وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وكذلك ملفات المحول.
- **فحص تيار التهييج – Excitation system test؛** وذلك للكشف عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي.
- **فحص المواسعة (Overall Capacitance)؛** وذلك للكشف أيضاً عن الحالة الفيزيائية للقلب الحديدي وملفات المحول، ولكن هنالك عدة عوامل من شأنها التأثير على قيمة المواسعة غير تشوّ الملفات مثل درجة الحرارة، بالإضافة إلى أن حساسية فحص المواسعة ليست كبيرة أي أن تشوّه أو إزاحة كبيرة في الملفات قد لا تظهر في فحص المواسعة أو قد تعطي تغيُّر طفيف على قيمة المواسعة المُقاسة.

12. أمثلة على نتائج فحوصات مَصنعيّة

12.1 المثال الأول: الشكل (**8-42**) يُبين قِيَم فحص تحليل إستجابة ترددية مَسحي (**SFRA**) مَصنعي (**FAT**) لمحول ثلاثي الأطوار ثنائي الملفات (**Three Phase Two Winding**) موصول بطريقة (**YNd11**) ذو مُغيّر خطوة من نوع (**OLTC**).



Measurement of frequency response
Test Device : FRAX-101(Megger) — Oil temperature:18.1℃

The procedure of measurement

Test winding	Tapping position	Input terminal	Output terminal
HV winding	1	O	A
	1	O	B
	1	O	C
LV winding	/	a	b
	/	b	c
	/	c	a

Measured waveform

O-A — a-b
O-B — b-c
O-C — c-a

Test results	Provide the measured wave form curve.

الشكل رقم (**8-42**)

12.2 المثال الثاني: الأشكال **(8-43&44)** تُبيّن قِيَم فحص إستجابة ترددية مسحي **(SFRA)** مَصنعي **(FAT)** لمحول ثلاثي الأطوار ثلاثي الملفات **(Three Phase Tertiary Winding)** موصول بطريقة **(YNd11-d11)** ذو مُغيّر خطوة من نوع **(OLTC)**.

Measurement of frequency response

Test Device : FRAX-101(Megger) Oil temperature:16℃

The procedure of measurement

Test winding	Tapping position	Input terminal	Output terminal
HV winding	1	O	A
	1	O	B
	1	O	C
1 LV1 winding	/	a1	b1
	/	b1	c1
	/	c1	a1
2 LV2 winding	/	a2	b2
	/	b2	c2
	/	c2	a2

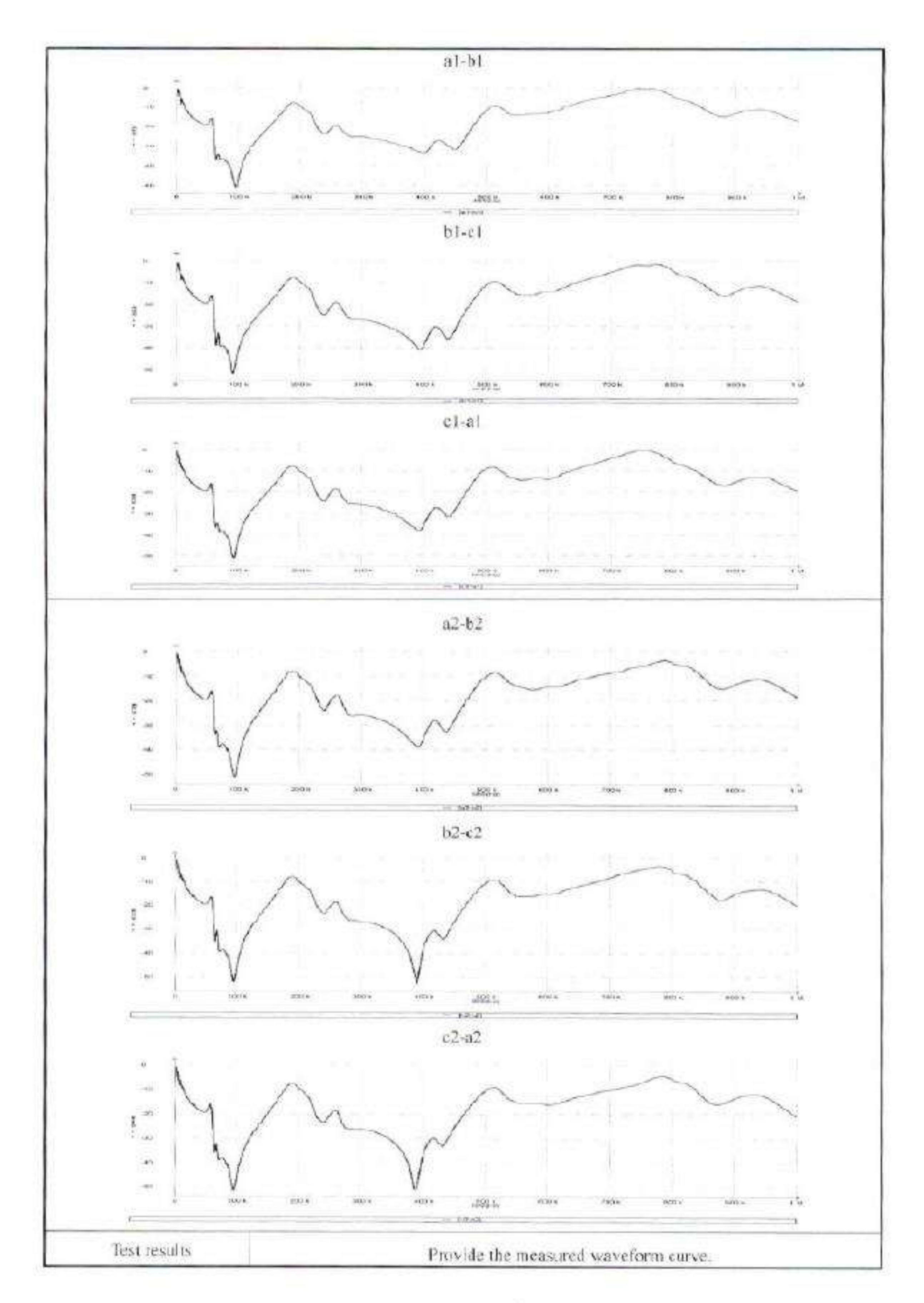
Measured waveform

O-A

O-B

O-C

الشكل رقم **(8-43)**



الشكل رقم (8-44)

الملحق (1-8)

تنويه

يضم هذا المُلحق خطوات الفحص وتوصيلاته بالإضافة إلى الخطوات التشغيلية للجهاز بشكل مُبسّط إستناداً على الخبرة بالتعامل مع هذه الأجهزة، وتَجدُر الإشارة أنه في حال إستخدام جهاز الفحص المُشار إليه في هذا الملحق لا يجب الإعتماد على هذا الملحق فقط، بل يجب قراءة الكُتيبات التفصيلية الخاصة بهذا الجهاز والمزودة بواسطة الشركة المُصنعة للجهاز جيـــــــــــــداً وخصوصاً الخطوات التشغيلية و السلامة العامة

فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي بإستخدام جهاز FRAX 99 by MEGGER



الشكل رقم (1-1-8)

- **مواصفات الجهاز:** حسب الـ(FRAX Brochure)
  - فولتية المدخل الإسمية : 11 – 16 Vdc, 25 W
  - نطاق التردد : 0.1 Hz – 25 MHz
  - دقة التردد : 0.01%
  - الفولتية : 20 Vp-p
  - مُعاوقة المدخل : 50 Ω
  - مُعاوقة المخرج : 50 Ω
  - البيئة التشغيلية المحيطة : -4° F to 131° F (-20° C to 55° C) RH to 95%, Non condensing
  - البيئة التخزينية المحيطة : -22 to 158° F (-30 to +70°C)
  - أبعاد الجهاز : 250 x 169 x 52 mm
  - وزن الجهاز : 1.4 lb. (3.1 kg), without battery

- **خطوات الفحص بواسطة هذا الجهاز:**

1. التأكد من تطبيق الخطوات (**5.1** إلى **5.9**) الواردة في فقرة خطوات الفحص من فصل فحص تحليل الإستجابة الترددية المَسحي (**SFRA**).
2. التأكد من أن الدائرة المُراد فحصها غير مُكهربة وعدم وجود إحتمالية لكهربتها أثناء الفحص.
3. التأكد من أن أسلاك التوصيل الخاصة بجهاز الفحص (**Test leads**) وكذلك المشابك الخاصة بها (**Clamps**) في حالة جيدة وغير مُتسخة ولا تعاني من أية أضرار فيزيائية كالشقوق أو الكسور.
4. تجنب لمس دائرة الفحص أثناء إجراء الفحص أو بعده، إلا بعد التأكد من عدم وجود فولتية.
5. التأكد من أن جهاز الفحص المُراد إستخدامه مُعاير (**Calibrated**).
6. قبل البدء بالفحص يُفضّل التعرُّف على أجزاء جهاز الفحص من أزرار ومنافذ كما هو مُبين بالشكل (**8-1-2**)، بالإضافة للشكل (**8-1-3**) الذي يوضح الكوابل المُوردة مع جهاز الفحص.



الشكل رقم (8-1-2)

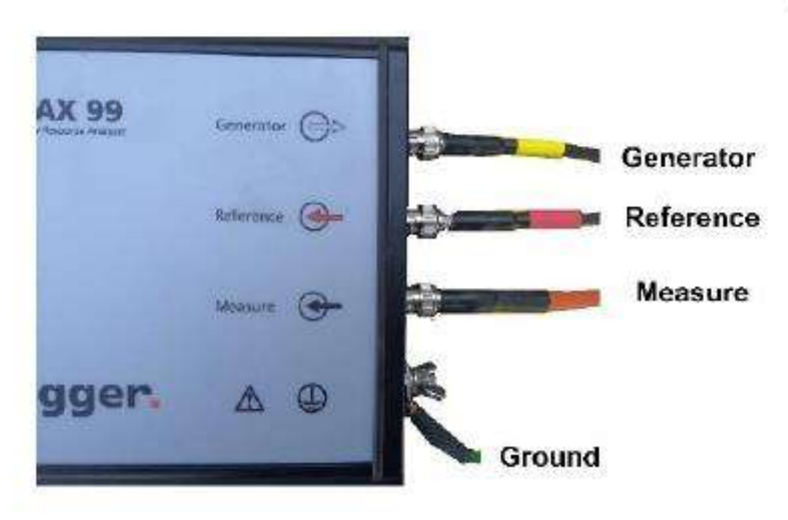


الشكل رقم (8-1-3)



تحذير: لا تَقُم بإستخدام جهاز الفحص في الأجواء القابلة للإنفجار، بالإضافة للأجواء الماطرة والمثلجة.

7. تهيئة منطقة الفحص عبر مراعاة الأمور التالية:
   7.1 التأكد من أن منطقة الفحص جافة قدر الإمكان.
   7.2 التأكد من عدم وجود مواد قابلة للإشتعال في منطقة الفحص.
   7.3 التأكد من التهوية الجيدة لمنطقة الفحص فيما إذا كانت مغلقة.
   7.4 التأكد من سلامة نظام التأريض في منطقة الفحص.
8. وصل جهاز الفحص بالأرض (**Local station earth**) عبر منفذ التأريض رقم (**1**) في الشكل (**8-1-2**) بواسطة الكيبل المُورَّد مع الجهاز من قِبَل الشركة المُصنِّعة. (يجب أن يكون كيبل التأريض أول كيبل يتم وصله بالجهاز وآخِر كيبل يتم إزالته عن الجهاز).
9. التأكد من أن خزان المحول موصول بالأرض (**Local station earth**) عبر مسار تأريض ذو مُعاوقة قليلة (**Low Impedance**).
10. التأكد من أن كيبل الأرضي لمصدر الطاقة الكهربائي الخاص بجهاز الفحص موصول بالأرض (**Local station earth**) بمُعاوقة قليلة (**Low Impedance**) في حال عدم تشغيل الجهاز بالإعتماد على البطارية الخاصة به.
11. توصيل الكوابل بجهاز الفحص عبر المرابط من النوع (**BNC connector**) لكل من الكوابل التالية:
    11.1 توصيل كيبل مولد الموجة (**Generator**) المُشار إليه باللون الأصفر بالمنفذ رقم (**2**) المُبين في الشكل (**8-1-2**).
    11.2 توصيل كيبل قياس موجة المدخل المرجعيّة (**Reference**) المُشار إليه باللون الأحمر بالمنفذ رقم (**3**) المُبين في الشكل (**8-1-2**).
    11.3 توصيل كيبل قياس موجة المخرج (**Measure**) المُشار إليه باللون الأسود بالمنفذ رقم (**4**) المُبين في الشكل (**8-1-2**).



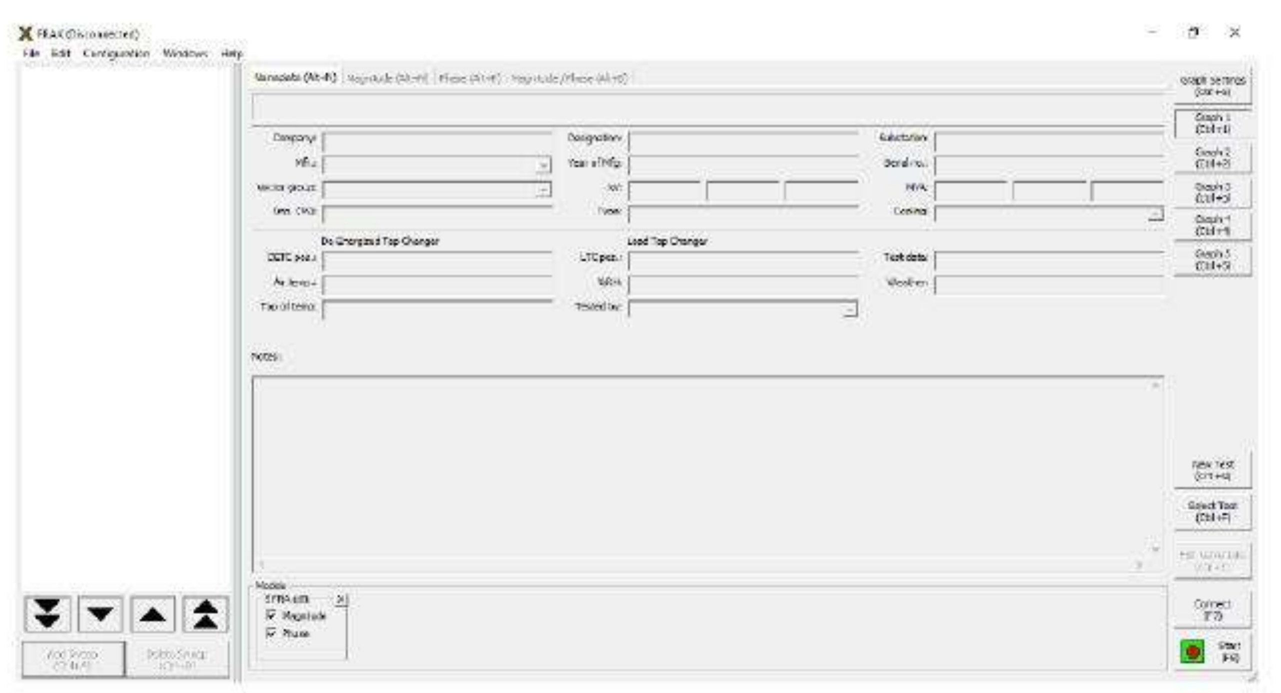
الشكل رقم (8-1-4)

12. توصيل أسلاك محول الفولتية **(AC/DC)** على منفذ مصدر الطاقة رقم **(5)** المُبين في الشكل **(8-1-2)** وكذلك توصيل محول الفولتية بمصدر الطاقة الرئيسي **(AC)**.
13. توصيل جهاز الفحص بجهاز الحاسوب بواسطة كيبل الـ**(USB)** عبر المنفذ رقم **(7-1-8)**.
14. تشغيل الجهاز بواسطة زر التشغيل رقم **(6)** في الشكل **(8-1-2)**.
15. تشغيل البرنامج الخاص بجهاز الفحص **(FRAX v2.5)** بالضغط على الأيقونة الظاهرة في الشكل **(8-1-5)** أدناه.



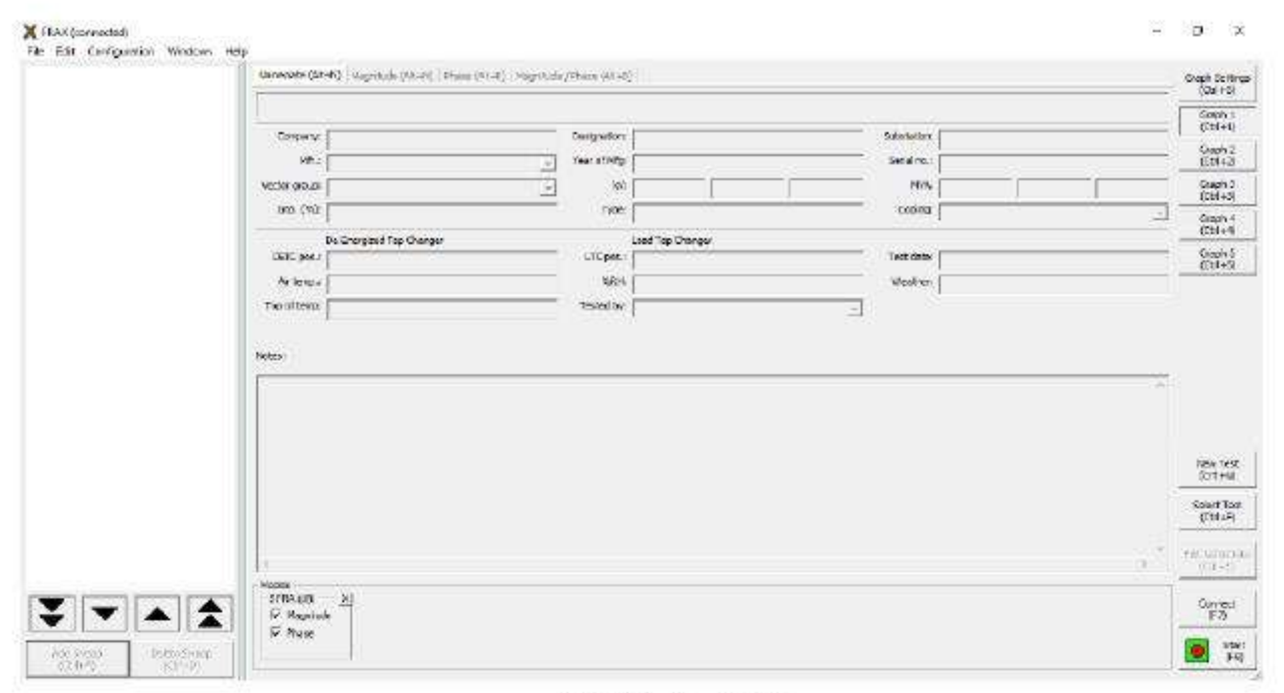
الشكل رقم **(8-1-5)**

16. بعد تشغيل البرنامج ستظهر الشاشة المُبينة في الشكل **(8-1-6)** والتي يظهر فيها على شريط العنوان **(Title bar)** أعلى الشاشة أن جهاز الفحص غير موصول بجهاز الحاسوب **(FRAX (Disconnected))**.



الشكل رقم **(8-1-6)**

17. نقوم بالضغط على زر **(Connect)** لتوصيل جهاز الفحص بجهاز الحاسوب لتتغيّر الحالة على شريط العنوان وتصبح **(FRAX (Connected))** كما يظهر في الشكل **(8-1-7)**.



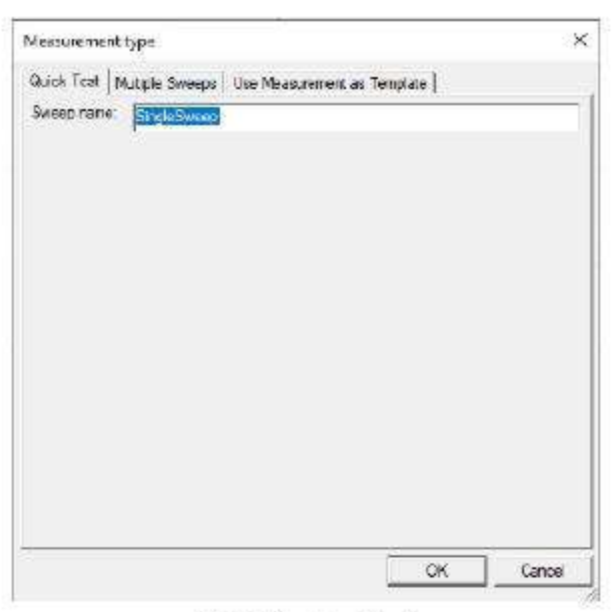
الشكل رقم (8-1-7)

في حال حدوث خطأ في التوصيل ستظهر النافذة الظاهرة في الشكل (8-1-8) أدناه، والتي منها يتم إختيار المنفذ المناسب وعادةً ما تكون هنالك علامة خضراء بجانب المنفذ بعد ذلك يتم الضغط على زر الموافقة (**OK**).



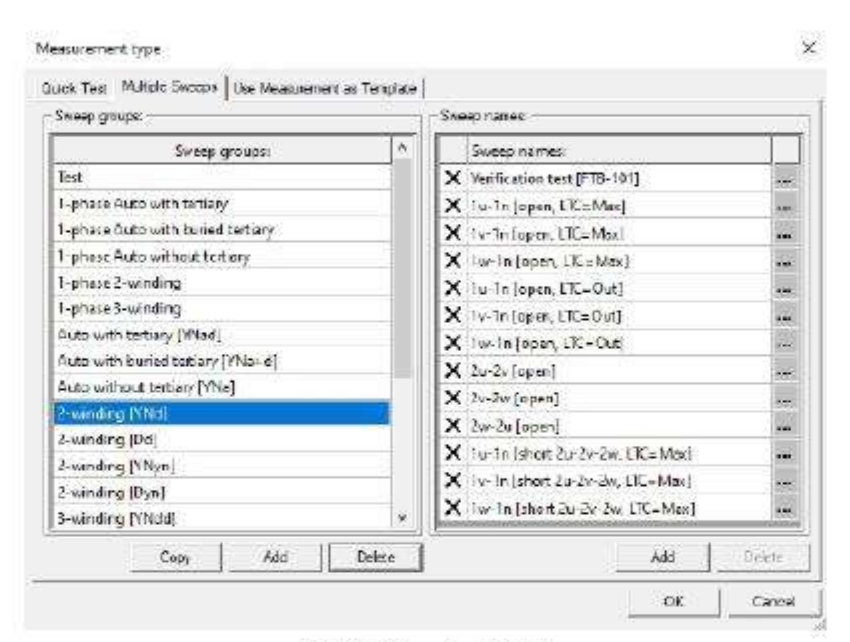
الشكل رقم (8-1-8)

18. تحديد إعدادات الفحص الجديد بالضغط على زر (**New Test**) الظاهر في الشكل (8-1-6) لتظهر النافذة المبينة في الشكل (8-1-9) والتي تكون على علامة التبويب (**Quick Test**) التي من خلالها يُمكن إجراء فحص واحد فقط (**Single sweep**).



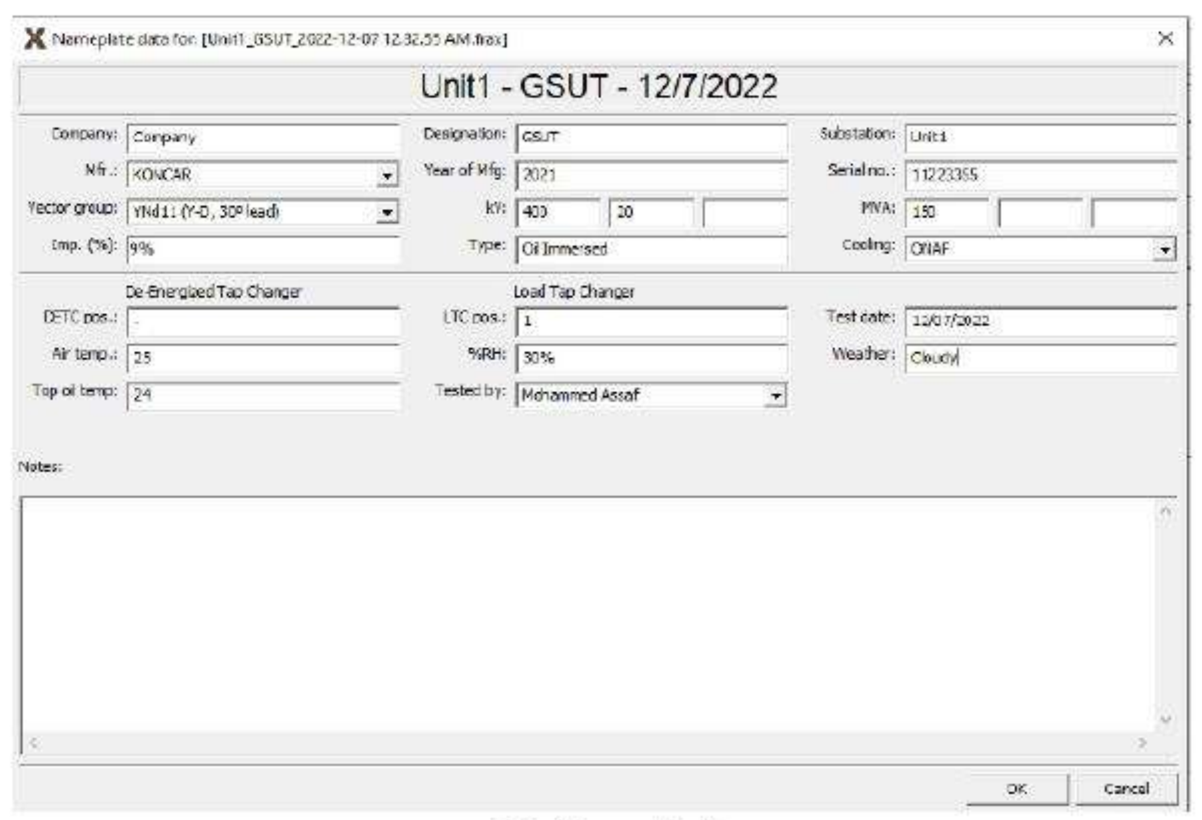
الشكل رقم (8-1-9)

19. إختيار علامة التبويب (**Multiple Sweeps**) التي من خلالها يُمكن إجراء أكثر من فحص بحيث يتم تحديد الفحوصات والأساليب التي سيتم إجراء الفحص بها وفقاً لنوع المحول فيما إذا كان آحادي الطور أو ثلاثي الطور بالإضافة لعدد الملفات فيما إذا كان ثنائي الملفات أو ثلاثي الملفات كما يظهر بالشكل (**8-1-10**). حيث تم إختيار المحول ثلاثي الطور ثنائي الملفات ذو التوصيلة (**YNd**) وبعد ذلك يقوم البرنامج بعرض بعض الأساليب التي يُمكن إجراء الفحص بها والتي يُمكن الإضافة عليها أو حذفها ومن ثم يتم الضغط على زر الموافقة (**OK**).



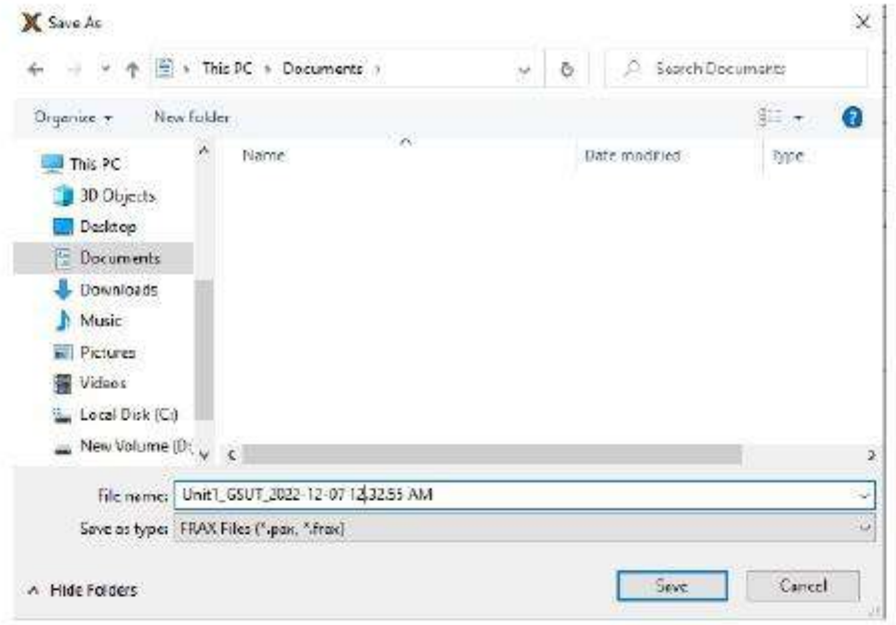
الشكل رقم (8-1-10)

20. بعد ذلك تظهر النافذة المُبينة بالشكل (**8-1-11**) والخاصة ببيانات المحول المُراد فحصه بالإضافة لمعلومات البيئة المحيطة من درجة حرارة ورطوبة، ثم يتم الضغط على زر الموافقة (**OK**).



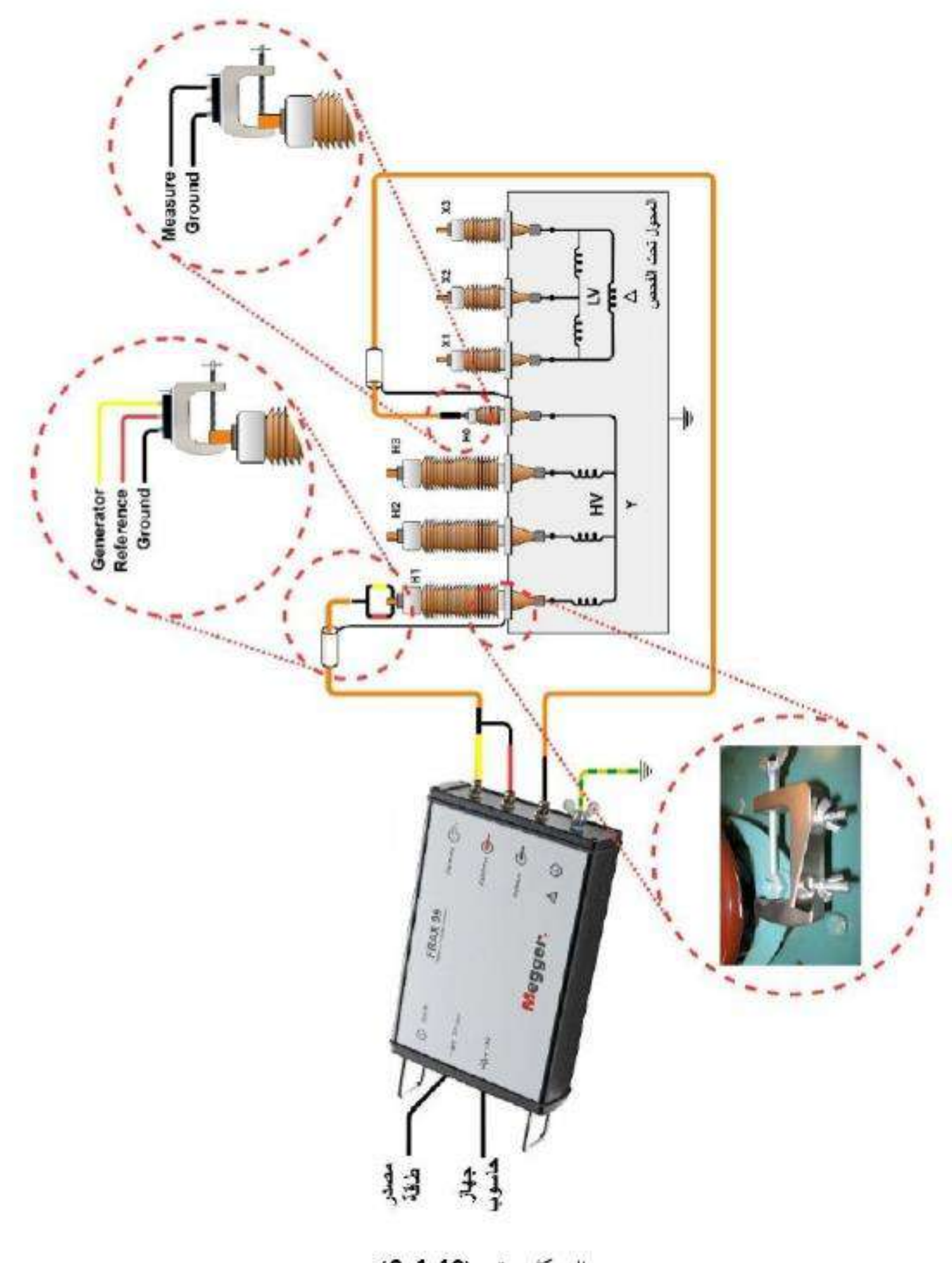
الشكل رقم (8-1-11)

21. بعد ذلك تظهر النافذة المُبينة بالشكل (**8-1-12**) والتي من خلالها يتم تحديد مكان حفظ ملف الفحص الجديد الذي تم إنشاؤه بصيغة (***.pax, *.frax**) ومن ثم الضغط على زر حفظ (**Save**).



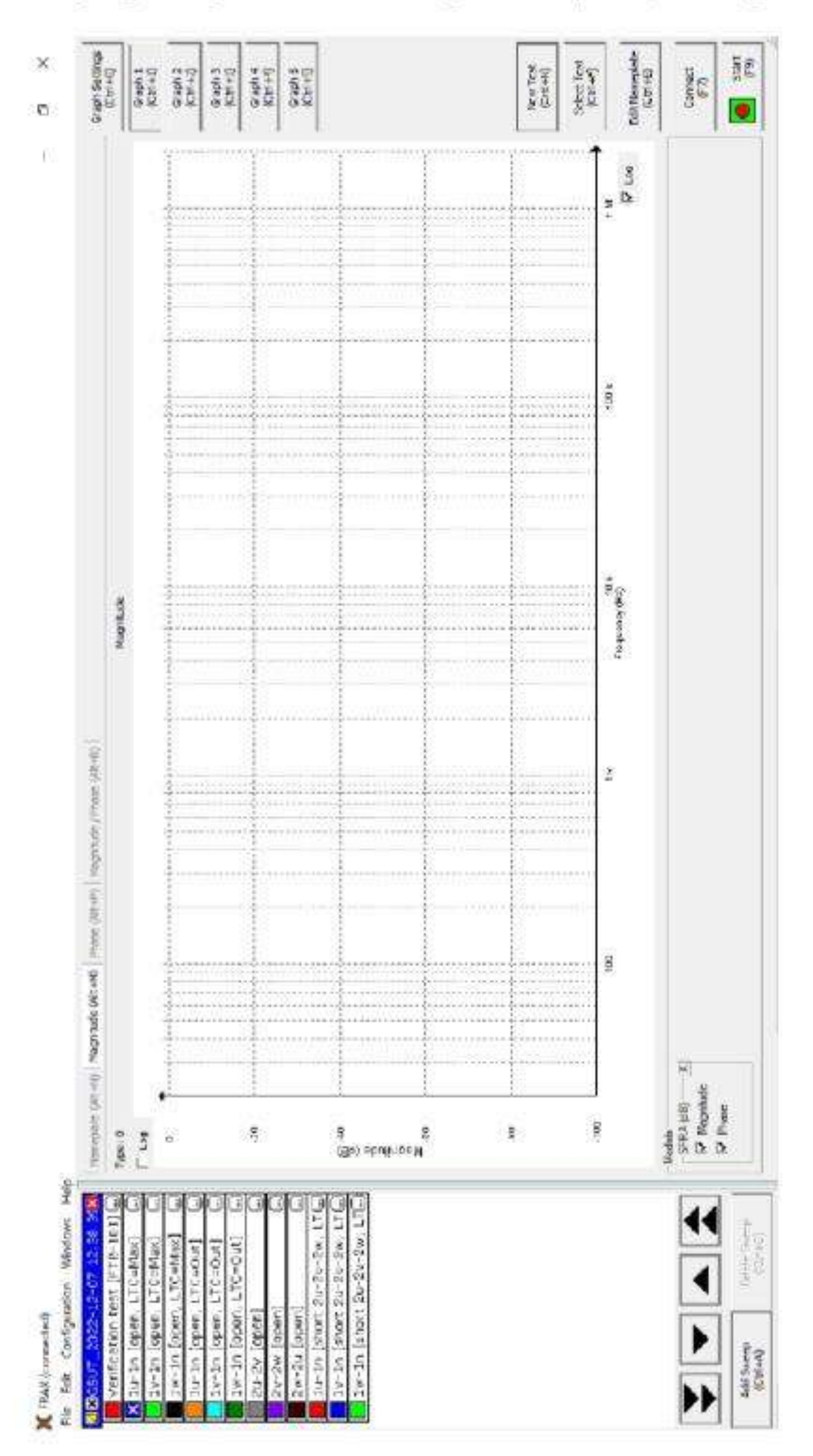
الشكل رقم (8-1-12)

22. توصيل كوابل الفحص بالمحول كما هو مُبين بالشكل (**8-1-13**) والذي يوضح التوصيلة المناسبة للفحص على الطور الأول بأسلوب (**End to end open circuit**).



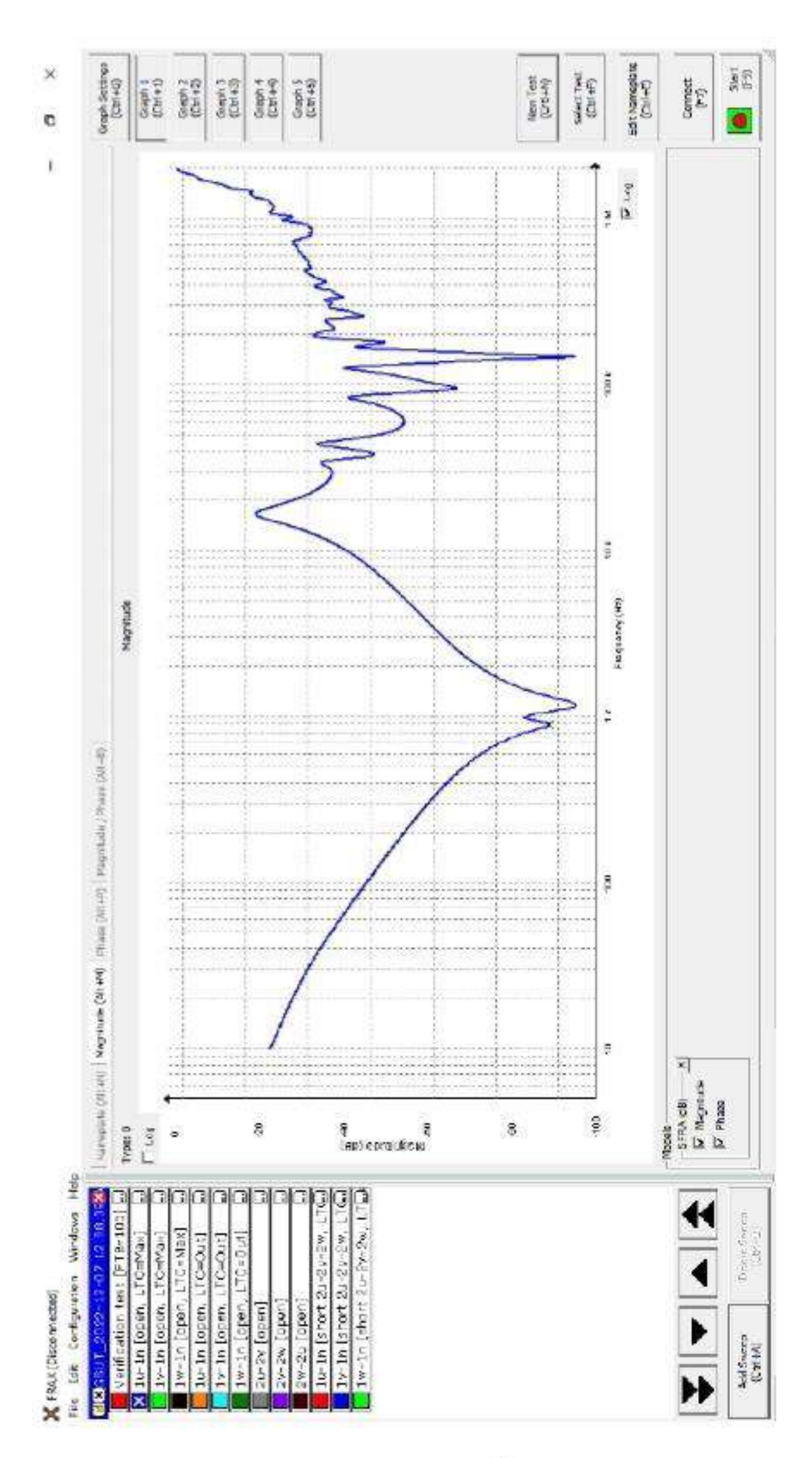
الشكل رقم (**8-1-13**)

23. تحديد الفحص المراد البدء به بوضع علامة (**X**) بجانبه وذلك بعد التأكد من توصيلته المناسبة ومن ثم الضغط على زر بدء (**Start**) أسفل يمين الشاشة لبدء الفحص كما هو مُبين بالشكل (**8-1-14**).



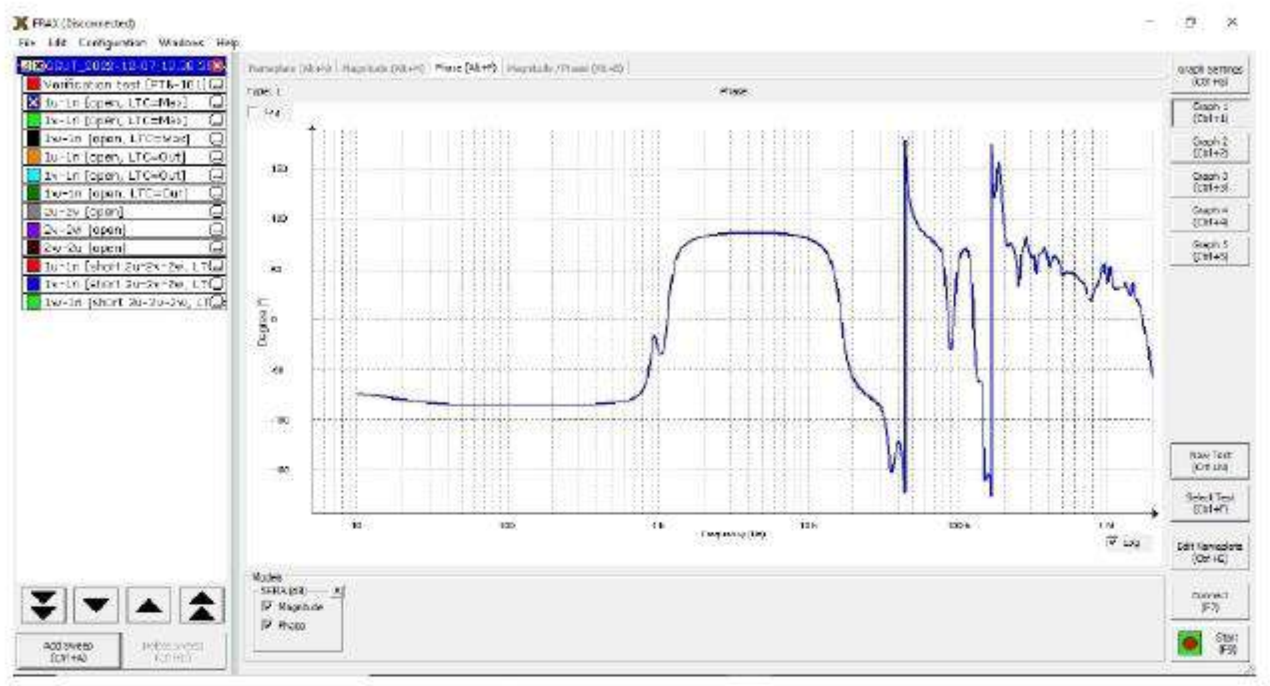
الشكل رقم (**8-1-14**)

24. بعد إنتهاء الفحص تظهر الرسمة المُبينة بالشكل (**8-1-15**) والخاصة برسمة السِعة أو المِقدار (**Magnitude**) بعدها يُمكن الإنتقال للفحص التالي وإجراؤه بنفس الأسلوب.



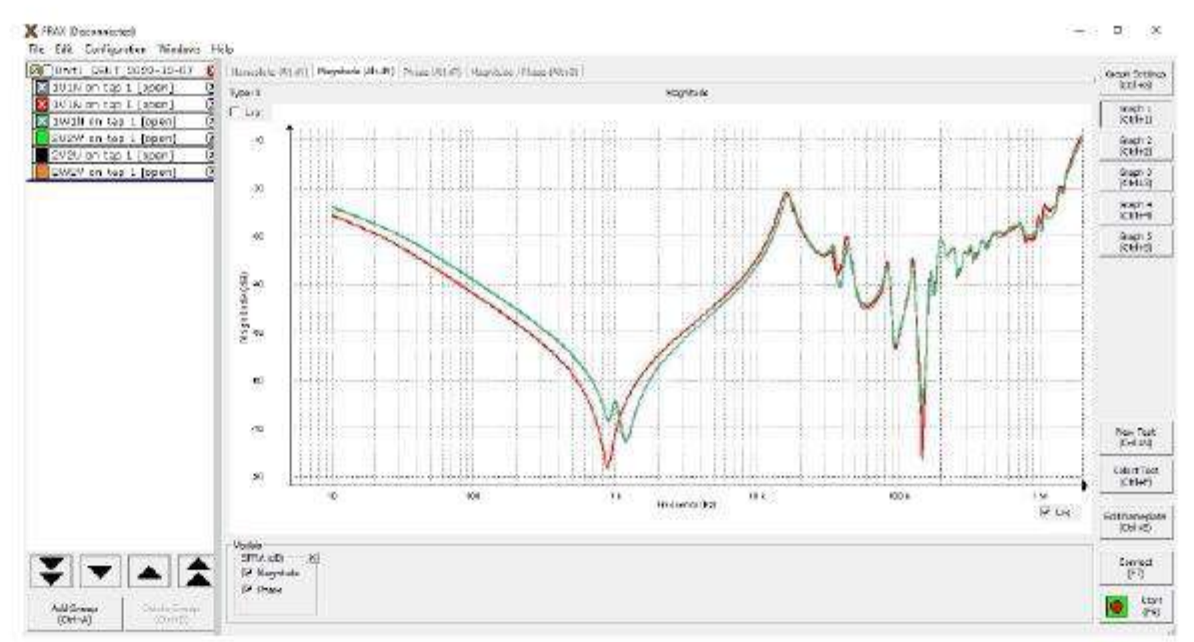
الشكل رقم (**8-1-15**)

أما فيما يَخُص رسمة فرق الطور (**Phase**) فإنه يُمكن الإنتقال إلى علامة التبويب (**Phase**) الظاهرة في الشكل (**8-1-15**) أعلاه للإنتقال لشاشة رسمة فرق الطور الظاهرة في الشكل (**8-1-16**).



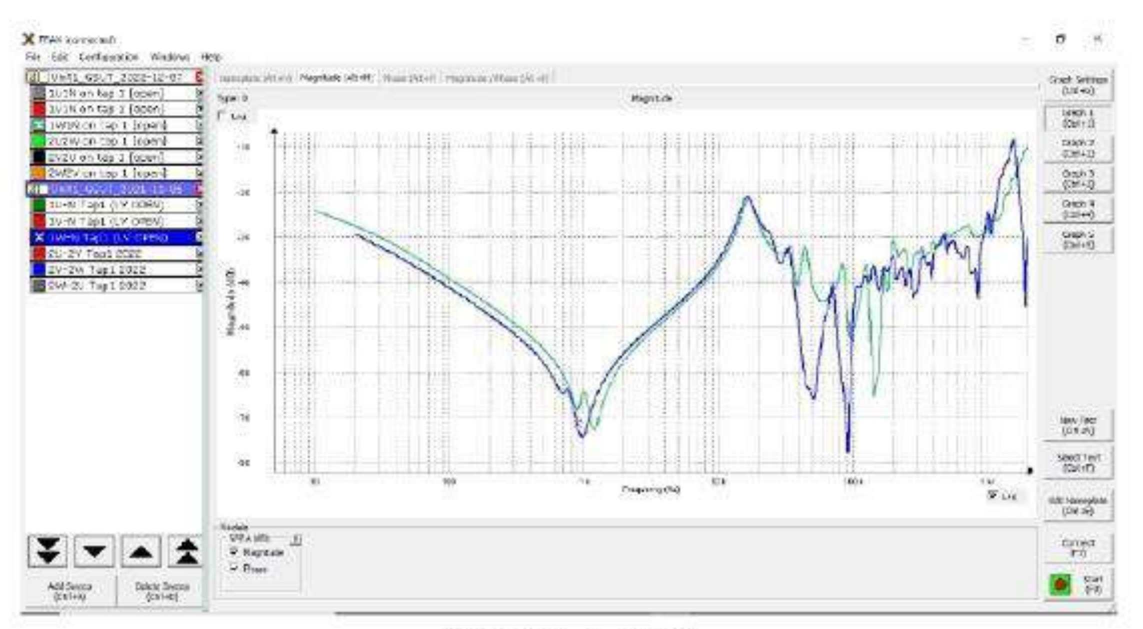
الشكل رقم (**8-1-16**)

25. يُمكن مقارنة نتيجة الفحص بين الأطوار الثلاثة وذلك بوضع علامة (**X**) في المربع الملون بجانب فحوصات الأطوار الثلاثة ليتم إسقاط نتائجها على نفس الرسمة لغايات المُقارنة كما هو مُبين بالشكل (**8-1-17**).



الشكل رقم (**8-1-17**)

26. ولعمل مقارنة بين فحوصات سابقة بعد الإنتهاء من الفحص يتم تحميل ملف الفحوصات السابقة عن طريق قائمة ملف (**File**) وإختيار تحميل فحص (**Load Test**) بعدها تحديد الفحص السابق المُراد تحميله ومن ثم الضغط على زر إفتح (**Open**) لتظهر لنا الشاشة المبينة بالشكل (**8-1-18**) والتي من خلالها يُمكن تحديد الفحوصات المُراد مقارنتها ببعضها بوضع علامة (**X**) بجانب الفحص لتظهر رسمته



الشكل رقم (**8-1-18**)



ملحوظة: يدعم هذا الجهاز تشغيل ملفات الفحص ذات الإمتدادات المُختلفة كتلك الصادرة عن أجهزة الفحص المُصنّعة بواسطة شركات أخرى كشركة (**Omicron**) و (**Doble**) وغيرها من ملفات الفحص.

الملحق (8-2)

الجدول أدناه يضُم مُلخص لبعض أعطال المحولات وتأثيرها على نتيجة فحص الإستجابة الترددية وفقاً لمجموعة من المعايير والدراسات والنشرات الفنية كما ورد في أطروحة الدكتوراة في جامعة كوينزلاند

[Mohd Yousof, Frequency Response Analysis for Transformer Winding Condition Monitoring – University of Queensland]

Components	Conditions	Frequency sensitivity
Main winding	Deformation within the main or top windings	20k t0 400k
	Movement of the main and top winding	400k to 1M
	Bulk winding movement between windings and clamping structure	2k to 20k
	Axial deformations of each single winding	>400k
	Disc space variation	>100k
	Radial deformation or movement	>50k
		>100k
		5k to 500k
	Shorted turns	>200k
		<2k
		<10k
	Axial displacement	>500k
		>100k
Core	Core deformation	<2k
	Magnetic core and circuits	<10k
Test leads	Variations in grounding practices for test leads	>2M
Others	Poor grounding condition at site	>500k
	Ground impedance variation	400k to 1M
	Residual magnetism	<2k
	Bushings	>1m

الملحق (3-8)

يضُم الجدول أدناه الفحوصات التي يُمكن إجراؤها للمحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات (Three phase two winding) وثلاثية الطور ثلاثية الملفات (Three phase tertiary winding) وما يُنصح بإجراؤه على الأقل وفقاً لمعهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات [IEEE, C57.149-2012].

المحولات ثلاثية الطور ثنائية الملفات

Table 1—Two winding transformers – 15 tests

Test type	Test #	3φ Δ-Y Group 2 θ ⇒ 30° LAG	3φ Y-Δ Group 2 θ ⇒ 30° LAG	3φ Δ-Δ Group 1 θ ⇒ 0°	3φ Y-Y Group 1 θ ⇒ 0°	1φ
HV Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	1	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2 (H1-H0)
	2	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	
	3	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	
LV Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	4	X1-X0	X1-X2	X1-X3	X1-X0	X1-X2 (X1-X0)
	5	X2-X0	X2-X3	X2-X1	X2-X0	
	6	X3-X0	X3-X1	X3-X2	X3-X0	
Short Circuit (SC) Short [X1-X2-X3][a]	7	H1-H3	H1-H0	H1-H3	H1-H0	H1-H2 Short [X1-X2][a]
	8	H2-H1	H2-H0	H2-H1	H2-H0	
	9	H3-H2	H3-H0	H3-H2	H3-H0	
Capacitive Inter-Winding All Other Terminals Floating	10	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	11	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	12	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (L) Ground (H- and X-)[b]	13	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1 Ground [H2, X2]
	14	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
	15	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	

[a]Indicates short circuit tests terminals are shorted together, but not grounded. The neutral is not included for 3φ Wye connections, but may be included for 1φ connections.

[b]Denotes other end of winding: opposite of the reference and measure connections.

Table 5—Three winding transformer Part 1 – 36 tests

Test type	Test #	3φ Δ-Δ-Δ Group 1 $\theta \Rightarrow 0°$	3φ Δ-Δ-Y Group 2 $\theta \Rightarrow 30°$ LAG	3φ Δ-Y-Δ Group 2 $\theta \Rightarrow 30°$ LAG	3φ Δ-Y-Y Group 2 $\theta \Rightarrow 30°$ LAG	1ϕ
HV Open Circuit (OC)	1	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H2
All Other Terminals Floating	2	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	(H1-H0)
	3	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	
LV (X) Open Circuit (OC)	4	X1-X3	X1-X3	X1-X0	X1-X0	X1-X2
All Other Terminals Floating	5	X2-X1	X2-X1	X2-X0	X2-X0	(X1-X0)
	6	X3-X2	X3-X2	X3-X0	X3-X0	
LV (Y) Open Circuit (OC)	7	Y1-Y3	Y1-Y0	Y1-Y3	Y1-Y0	Y1-Y2
All Other Terminals Floating	8	Y2-Y1	Y2-Y0	Y2-Y1	Y2-Y0	(Y1-Y0)
	9	Y3-Y2	Y3-Y0	Y3-Y2	Y3-Y0	
Short Circuit (SC)	10	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H0
High (H) to Low (X)	11	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	Short
Short [X1-X2-X3][a]	12	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	[X1-X2][a]
Short Circuit (SC)	13	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H3	H1-H0
High (H) to Low (Y)	14	H2-H1	H2-H1	H2-H1	H2-H1	Short
Short [Y1-Y2-Y3][a]	15	H3-H2	H3-H2	H3-H2	H3-H2	[Y1-Y2][a]
Short Circuit (SC)	16	X1-X3	X1-X3	X1-X0	X1-X0	X1-X0
Low (X) to Low (Y)	17	X2-X1	X2-X1	X2-X0	X2-X0	Short
Short [Y1-Y2-Y3][a]	18	X3-X2	X3-X2	X3-X0	X3-X0	[Y1-Y2][a]
Capacitive Inter-Winding	19	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
High (H) to Low (X)	20	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	
All Terminals Float	21	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	
Capacitive Inter-Winding	22	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
High (H) to Low (Y)	23	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	
All Terminals Float	24	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	
Capacitive Inter-Winding	25	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
Low (X) to Low (Y)	26	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	
All Terminals Float	27	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	
Inductive Inter-Winding	28	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
High (H) to Low (X)	29	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2	Ground
Ground (H- and X-)[b]	30	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3	[H2, X2]
Inductive Inter-Winding	31	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
High (H) to Low (Y)	32	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	Ground
Ground (H- and Y-)[b]	33	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	[H2, Y2]
Inductive Inter-Winding	34	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
Low (X) to Low (Y)	35	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	Ground
Ground (X- and Y-)[b]	36	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	[X2, Y2]

[a] Indicates short circuit tests: terminals are shorted together, but not grounded. The neutral is not included for 3ϕ Wye connections, but may be included for 1ϕ test connections.
[b] Denotes other end of winding; opposite of the reference and measure connections.

Table 6—Three winding transformer Part 2 – 36 tests

Test type	Test #	3φ Y-Y-Y Group 1 θ ⇒ 0°	3φ Y-Y-Δ Group 2 θ ⇒ 30° LAG	3φ Y-Δ-Y Group 2 θ ⇒ 30° LAG	3φ Y-Δ-Δ Group 2 θ ⇒ 30° LAG
HV Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	1	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	2	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	3	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
LV (X) Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	4	X1-X0	X1-X0	X1-X2	X1-X2
	5	X2-X0	X2-X0	X2-X3	X2-X3
	6	X3-X0	X3-X0	X3-X1	X3-X1
LV (Y) Open Circuit (OC) All Other Terminals Floating	7	Y1-Y0	Y1-Y2	Y1-Y0	Y1-Y2
	8	Y2-Y0	Y2-Y3	Y2-Y0	Y2-Y3
	9	Y3-Y0	Y3-Y1	Y3-Y0	Y3-Y1
Short Circuit (SC) High (H) to Low (X) Short [X1-X2-X3][a]	10	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	11	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	12	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
Short Circuit (SC) High (H) to Low (Y) Short [Y1-Y2-Y3][a]	13	H1-H0	H1-H0	H1-H0	H1-H0
	14	H2-H0	H2-H0	H2-H0	H2-H0
	15	H3-H0	H3-H0	H3-H0	H3-H0
Short Circuit (SC) Low (X) to Low (Y) Short [Y1-Y2-Y3][a]	16	X1-X0	X1-X0	X1-X2	X1-X2
	17	X2-X0	X2-X0	X2-X3	X2-X3
	18	X3-X0	X3-X0	X3-X1	X3-X1
Capacitive Inter-Winding High (H) to Low (X) All Terminals Float	19	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	20	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2
	21	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3
Capacitive Inter-Winding High (H) to Low (Y) All Terminals Float	22	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
	23	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2
	24	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3
Capacitive Inter-Winding Low (X) to Low (Y) All Terminals Float	25	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
	26	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2
	27	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (X) Ground (H- and X-)[b]	28	H1-X1	H1-X1	H1-X1	H1-X1
	29	H2-X2	H2-X2	H2-X2	H2-X2
	30	H3-X3	H3-X3	H3-X3	H3-X3
Inductive Inter-Winding High (H) to Low (Y) Ground (H- and Y-)[b]	31	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1	H1-Y1
	32	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2	H2-Y2
	33	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3	H3-Y3
Inductive Inter-Winding Low (X) to Low (Y) Ground (X- and Y-)[b]	34	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1	X1-Y1
	35	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2	X2-Y2
	36	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3	X3-Y3

[a]Indicates short circuit tests: terminals are shorted together, but not grounded. The neutral is not included for Wye connections.

[b]Denotes other end of winding; opposite of the reference and measure connections.

قائمة المصطلحات

يضم الجدول مجموعة من المصطلحات وفقاً لترتيب ورودها في هذا الكتاب، حيث تمت الترجمة بالإعتماد على معجم المصطلحات الخاص باللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) وتارة تبعاً للمراجع الكهربائية العربية وتارة أخرى بالإجتهاد الشخصي، والهدف من تعريب المصطلحات زيادة الفهم ونسأل الله السداد

المصطلح بالإنجليزية	المصطلح بالعربية
Power transformer	محولات قدرة / قوى
Voltage	فولتية / جهد
AC	متردد / متناوب
DC	ثابت / مستمر
Rated	إسمي / كامل
Losses	ضياعات / خسائر / مفاقيد
HV winding	ملفات الفولتية المرتفعة
LV winding	ملفات الفولتية المنخفضة
Idea transformer	محول مثالي
Actual transformer	محول حقيقي / واقعي
Permeability	نفاذية
Iron core	القلب الحديدي
Hysteresis losses	الضياعات الهستيرية / التباطؤ
Leakage flux	الفيض المُتسرب / التسرُبي
Eddy currents	تيارات دّوامية
Phasor diagram	المُخطط المُتجهي / الشُعاعي
Peak value	القيمة العُظمى
RMS	الجذر التربيعي لمتوسط القِيَم المُربعة
Angular speed	السرعة الزاويّة
Magnetization Current	تيار تهييج / مغنطة
Residual magnetism	مغناطيسية مُتبقية
Stray losses	ضياعات شاردة
Circulating currents	تيارات دوّارة

عوازل إختراق / جُلَب	Bushings
خزان التمدد / التعويض	Conservator tank
مُشع / مبادل حراري	Radiator
فئة / نوع	Grade
حشيّة / حلقات مطاطية	Gasket
درفلة / سحب	Rolling
رقائق / صفائح	Laminations
ساق / عامود	Limb
فك / مِقرَن	Yoke
ورنيش	Varnish
مفاعلات حثية	Reactors
ممانعة	Reluctance
وصلة تناكبية	Butted joint
وصلة تناكبية متداخلة	Interleaved non-step butted joint
وصلة زاويّة	Mitred joint
مُغيّر الخطوة / الفولتية / المآخذ	Tap changer (OLTC or DETC)
راتنج / رزين	Resin
أنابيب شعرية	Capillary tubes
مؤشر / مُبين حرارة	Temperature indicator
فصل قسري	Trip
قرون / فجوة التفريغ	Arcing horn
حارفة / مانعة الصواعق	Surge Arrester
فحص غير تدميري	Non-destructive test
فحص قبول مَصنعي	Factory Acceptance Test - FAT
فحص قبول موقعي	Site Acceptance Test - SAT
كهربة / شحن المحول	Transformer energization
تيار الشحن السَعوي	Capacitive charging current
التيار الممتص من العازل	Dielectric absorption current
التيار المُتسرب / الموصل	Conduction or leakage current
تيار التفريغ الجزئي	Partial discharge current
تيار التسرُب السطحي	Surface leakage current
مؤشر الإمتصاص	Absorption Index - AI
مؤشر الإمتصاص	Dielectric Absorption Ratio - DAR
مؤشر الإستقطاب	Polarization Index
فجوات هوائية	Voids

مجموعة التوصيل	Vector/Connection group
حالة اللاحمل	No-load
مُعاوقة / مُمانعة القِصَر	Short-circuit impedance
القدرة الفعالة	Active power
القدة غير الفعالة	Reactive power
القدرة الظاهرية	Apparent power
معامل القدرة	Power Factor - PF
معامل التبديد	Dissipation Factor – DF
مُفاعلة التسرُب	Leakage Reactance

قائمة المصادر

No.	Reference
1	Paul Gill, Electrical power equipment maintenance and testing second edition
2	Jill C. Duplessis, Electrical field tests for the life management of transformers
3	IEEE Std C57.12.00-2000 (Standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
4	IEEE Std C57.12.00-2015 (Standard general requirements for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
5	IEEE Std C57.12.80-2010 (Standard terminology for power and distribution transformers)
6	IEEE Std C57.12.90-2006 (Standard test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
7	IEEE Std C57.12.90-2015 (Standard test code for liquid-immersed distribution, power, and regulating transformers)
8	IEEE Std C57.104-2008 (Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers)
9	IEEE Std C57.104-2019 (Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers)
10	IEEE Std C57.106-2015 (Guide for acceptance and maintenance of insulating mineral oil in electrical equipment)
11	IEEE Std C57.131-2012 (Standard requirements for tap changers)
12	IEEE Std C57.152-2013 (Guide for diagnostic field testing of fluid-filled power transformers, regulators, and reactors)
13	IEEE Std C57.19-100-2012 (Guide for application of power apparatus bushings)
14	IEEE Std C57.19.00-2004 (Standard general requirements and test procedure for power apparatus bushings)
15	IEEE Std 1861-2014 (Guide for on-site acceptance tests of electrical equipment and system commissioning of 1000 kV AC and above)
16	IEEE Std 76-1974 (Guide for acceptance and maintenance of transformer Askarel in equipment)
17	IEEE Std 62-2005 (Guide for diagnostic field testing of electric power apparatus-part 1: Oil filled power transformers, regulators, and reactors)
18	IEEE C57.19.01-2017 (Standard for performance characteristics and dimensions for power transformer and reactor bushings)
19	IEEE C57.149-2012 (Guide for the application and interpretation of frequency response analysis for oil-immersed transformers)
20	IEEE Std 43-2013 (IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery)

21	IEC 60085-2007 Electrical insulation – Thermal evaluation and designation
22	IEC 60076-1 2011 Power transformers – Part 1: General
23	IEC 60137-2017 Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V
24	IEC, 60076-18 2012 Power transformers – Part 18: Measurements of frequency response
25	Mohammed W. Samara, Mohammed S. Assaf "The relationship between very fast transient and solids dielectric thermal breakdown" CIGRE conference, Apr 24,2018
26	Dr. Mahmoud Al Jelani, Power Transformers الأستاذ الدكتور محمود الجيلاني، المرجع في محولات القوى الكهربائية
27	Dr. Camelia Mohammad, Electrical transformers, part 1 الدكتورة كاميليا محمد، المحولات الكهربائية، الجزء الأول
28	ABB Ltd, Transformer handbook - 2004
29	ABB, Bushing diagnostics and conditioning - Product information 2750 515-142 en, Rev. 1
30	ABB, Service handbook for transformers
31	ABB, Testing of power transformers, routine tests, type tests and special tests
32	AREVA, Power transformers fundamentals, Vol. 1
33	AREVA, Power transformers Expertise, Vol. 2
34	CIGRE, Guide for transformer maintenance, 445, WGA2.34
35	Pavlos S. Georgilakis, Spotlight on Modern Transformer Design-Springer-Verlag (2009) London
36	James H. Harlow, Electric power transformer engineering, second edition
37	John Winders, Power transformers principles and applications
38	Janusz Turowski, Marek Turowski, Engineering electrodynamics electric machine, transformer, and power equipment design
39	Martin Heathcote, J & P Transformer Book, Thirteenth Edition
40	Purkait, Prithwiraj, Saha, Tapan Kumar, Transformer ageing monitoring and estimation techniques
41	William M. Flanagan, Handbook of transformer design and applications
42	Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra Ahuja, Transformer design principles - with Applications to core-form power transformers
43	USA Bureau of Reclamation, Testing solid insulation of electrical equipment, Vol. 3-1
44	USA Bureau of Reclamation, Testing and maintenance of high voltage bushings, Vol. 3-2
45	USA Bureau of Reclamation, Transformer maintenance, Vol. 3-30
46	USA Bureau of Reclamation, Transformer diagnostics, Vol. 3-31

47	S. V. Kulkrni, S. A. Khaparde, Transformer engineering – design, technology, and diagnostic, second edition
48	Brandon Dupuis, An introduction to electrical diagnostic testing of power transformers
49	Bruce Hembroff, Matz Ohlen, Peter Werelius, A guide to transformer winding resistance measurements - Application information
50	MEGGER, Transformer winding resistance measurement – Application note
51	MEGGER, Instruction manual for 2.5/5 kV megohmmeter test set Biddle catalog No. 210400
52	MEGGER, Instruction manual AVTM55JD for TTR transformer turn ration test set No. 550005 series
53	MEGGER, The complete guide to electrical insulation testing
54	MEGGER, Instruction manual for transformer ohmmeter DC winding resistance test set MTO210 Catalog No. MTO210
55	MEGGER, Instruction manual AVTM830280 for transformer Ohmmeter Catalog No. 830280
56	MEGGER, Instruction manual AVTM672001 for DELTA-2000 10kV automated insulation test set Catalog No. 672001 Rev. B
57	MEGGER, 5kV 10kV 15kV insulation testing use of guard terminal – Application note
58	Matz Ohlen, Peter Werelius, A guide to transformer ratio measurements – Application note, MEGGER, 2010-01-18
59	EPRI, Power transformer maintenance and application guide -Final report, Sep. 2002
60	Jing Wang, Research and analysis based on transformer DC resistance measurement data – AIP conference proceedings 2066, 020040 (2019)
61	Kamran Dawood, Fatih Isik, Guven Komurgoz, Analysis and optimization of leakage impedance in a transformer with additional winding: A numerical and experimental study 2022
62	Jerry Janesch, Two-Wire vs. Four-Wire Resistance Measurements: Which Configuration Makes Sense for Your Application?
63	ELTEL Industries, Low voltage capacitance & tan delta testing, measurement method & application
64	Oleh W. Iwanzirv, ELTEL Industries, The art and science of measuring the winding resistance of power transformers.
65	Brandon Dupuis, A Systematic approach to analyzing exciting current measurements on power transformers – OMICRON
66	Brandon Dupuis, An introduction to electrical diagnostic testing of power transformers - IEEE 2016 ESMO Conference & Exposition Guide and Program – Sep. 2016

67	Alexander Herrera, Lukas Klingenschmid, Measurement of short-circuit impedance, leakage reactance and frequency response of stray losses on power transformers – Application note OMICRON
68	Bernard Hochart - Power Transformer Handbook-Butterworth-Heinemann (1987)
69	DOBLE, Doble test procedure 72A-2244 Rev. A
70	Gabriel Faria, Matheus Pereira, Gustavo Lopes, Jansen Villibor, Paulo Tavares, Ivan Faria, Evaluation of capacitance and dielectric dissipation factor of distribution transformers, Electrical Insulation Conference (EIC), San Antonio, TX, USA, 17-20 June 2018
71	CHAUVIN ARNOUX Group, Insulation resistance testing guide Ed.01 2010
72	Niclas Gronstrom, Optimal demagnetization of transformer after winding resistance measurements, KTH Royal institute of technology
73	A. P. Marques, C. H. B. Azevedo, J. A. L. dos santos, F. R. de C. Sousa, N. K. Moura, C. J. Ribeiro, Y. A. dias, A. Rodrigues, A. S. Rocha, Brito, Insulation resistance of power transformers – method for optimized analysis
74	A.L. Rockley, R. E. Clark, E.H. Povey, Field measurements of transformer excitation current as a diagnostic tool, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 4, April 1981
75	Martin Anglhuber, Dielectric analysis of high voltage power transformers – Application note, OMICRON
76	Florian Tschnn, Lukas Klingenschmid, Negative dissipation factor – Application note, OMICRON
77	Dept. of air force, Field guide for inspection, evaluation, and maintenance criteria for electrical transformers, 32-1282 Vol. 2 1999
78	Joong Chung Kim, The determination of transformer leakage reactance by using an impulse driving function
79	E. P. Dick, Transformer diagnostic testing by frequency response analysis, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 6, Nov/Dec 1987
80	Richenbacher, Alan Gregg, Low voltage impulse testing of power transformers
81	Raka, Budo Milovic, OLTC dynamic testing
82	Ahmed Abu-Siada, Power transformer condition monitoring and Diagnosis, IET
83	William Taylor, Transformer practice manufacture, assembling, connection, operation, and testing
84	ANSI/NETA MTS-2007, Standard for maintenance testing specifications for electrical power distribution equipment and systems
85	OMICRON, Testrano 600 user manual Version ENU 11610508
86	Daniel Carreno, Dinesh Chajer, Transformer turn ratio test: some unknown facts

87	Daniel Carreno, Dinesh Chajer, Transformer winding resistance measurement: field challenges
88	Brandon Dupuis, Typical excitation current phase patterns, Technical paper
89	Brandon Dupuis, Typical excitation current tap-changer patterns, Technical paper
90	C. de Jesus Ribeiro, A. P. Marques, C. H. B. Azevedo, D. C. P. Souza, B. P. de Alvarenga, and R. G. Nogueira, "Faults and defects in power transformers – a case study", 2009 IEEE Electrical Insulation Conference, pp. 142–145, 2009
91	ANSI/NETA ATS-2009. Standard for Acceptance Testing Specifications for. Electrical Power Equipment and Systems
92	M. Horning, Transformer Maintenance Guide, second edition
93	Mohd Yousof, Frequency response analysis for transformer winding condition monitoring – University of Queensland
94	CIGRE, Mechanical condition assessment of transformer windings using frequency response analysis (FRA) 342
95	MEGGER, FRAX99/101/150 Sweep frequency response analyzer user manual No. AC033582FE 2020
96	MEGGER, TTRU3 True 3 phase transformer turns ratiometer user manual TTRU3-UG-EN-V01 2020
97	METREL, TeraOhmXA 10kV MI 3210 insulation tester instruction manual No. 20752185 V1.4.4

نبذة عن الكاتب

- محمد صبحي عساف من مواليد الكويت عام **1989**
- درس هندسة الطاقة الكهربائية في جامعة البلقاء التطبيقية (بوليتكنك)
- يعمل حالياً كمهندس صيانة كهربائية في شركة العطارات لتوليد الطاقة الكهربائية بواسطة الحرق المُباشر للصخر الزيتي بإستطاعة توليدية كُلّية قرابة **554** ميجاواط منذ عام **2019**
- عمل كمهندس صيانة كهربائية في شركة السمرا لتوليد الكهرباء بإستطاعة توليدية كُلّية قرابة **1241** ميجاواط (أكبر محطة توليد في الأردن) في الفترة ما بين **2012** إلى **2019**
- عضو نقابة المهندسين الأردنيين (**JEA**)
- عضو معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (**IEEE**)
- حاصل على شهادة إحترافية في الصيانة والموثوقية (**CMRP**) من معهد مُحترفي الصيانة والموثوقية (**SMRP**).
- حاصل على شهادة إحترافية كخبير مُعتمد في أنظمة الطاقة لحالات الطوارئ (**CEPSS**) من الرابطة الوطنية للحماية من الحرائق (**NFPA**).
- حاصل على شهادة مُعتمدة في السلامة والصحة المهنيّة من إدارة السلامة والصحة المهنيّة الأمريكية (**OSHA**)، بالإضافة لمجموعة من الدورات التقنية داخل وخارج الأردن.
- المشاركة في فحوصات مصنعيّة وموقعيّة لمجموعة من محولات القدرة مختلفة السعة.
- المشاركة في مؤتمر سيجري باريس (**CIGRE**) لعام (**2018**).
- المشاركة في مؤتمر سيجري عمان (**CIGRE**) لعام (**2018**) بورقة بحثية مُشتركة تناولت دراسة حول إنفجار عازل إختراق **400** كيلوفولت (قائمة المصادر رقم [25])

م. محمد عساف

Mo7ammed.assaf1@gmail.com

LinkedIn

م. صالح البطاط



LinkedIn

خبراء الصيانة الكهربائية

LinkedIn



Facebook

ISBN 978-9923-00-566-8 (ردمك)